



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

# **Datación por luminiscencia de depósitos fluviais y eólicos en el margen occidental de Galicia**

**Tesis Doctoral**

**Carlos Arce Chamorro**

**2017**

















# **Datación por luminiscencia de depósitos fluviales y eólicos desarrollados en el margen occidental de Galicia.**

Carlos Arce Chamorro

Tesis Doctoral

2017

Director:

D. Jorge Sanjurjo Sánchez

D. Juan Ramón Vidal Romaní

Tutor:

Dña. Soledad Muniategui Lorenzo

Programa Oficial de Doctoramiento en Ciencia y Tecnología Ambiental (DR 99/2011)

Universidade da Coruña



Imagen de portada: Depósito fluvial de Santa Cruz (Oleiros; A Coruña).

D. Jorge Sanjurjo Sánchez, Profesor Contratado Doutor da Universidade da Coruña, e D. Juan Ramón Vidal Romaní, Catedrático da Universidade da Coruña, da Área de Xeodinámica Externa

CERTIFICAN

Que o presente traballo de investigación orixinal titulado: DATACIÓN POR LUMINISCENCIA DE DEPÓSITOS FLUVIALES Y EÓLICOS DESARROLLADOS EN EL MARGEN OCCIDENTAL DE GALICIA foi realizado por Don Carlos Arce Chamorro e que, como directores do mesmo, autorizan a sua presentación como memoria de Tese Doutoral con obxecto de que sexa xulgada polo tribunal correspondente.

E para que así conste, expedimos e asinamos o presente documento na cidade da Coruña o 17 de Xulio de dous mil dezasete.

Asdo. D. Jorge Sanjurjo Sánchez

Director da Tese de Doutoramento

Asdo. D. Juan Ramón Vidal Romaní

Director da Tese de Doutoramento





*A mi madre y a mi padre  
por su comprensión y su apoyo incondicional,  
y a mi abuela Andrea, que a sus 99 años  
reparte sabiduría, ánimos y optimismo por doquier.*



*Escribí en el arenal  
los tres nombres de la vida:  
vida, muerte, amor.*

*Una ráfaga de mar,  
tantas claras veces ida,  
vino y los borró.*

Miguel Hernández  
(Cancionero y romancero de ausencias, 1938-1941)





## Agradecimientos

Quisiera expresar mi gratitud a los directores de este trabajo de Tesis Doctoral, D. Jorge Sanjurjo Sánchez y D. Juan Ramón Vidal Romaní, por confiar en mí y ofrecerme la oportunidad de llevar a cabo su realización. Mi formación académica guarda relación con las ciencias biológicas, por lo que la ayuda recibida por ellos en los campos de la técnica de datación por luminiscencia y la geodinámica externa ha sido inestimable. También me gustaría agradecer el respeto mostrado y su implicación, de la que he sido beneficiario y que me ha permitido avanzar otro paso más en mi formación. Gracias por vuestros consejos y por vuestra ayuda.

He de agradecer al Instituto Universitario de Xeoloxía Isidro Parga Pondal (IUX) y a los Servicios de Apoio a Investigación (SAI) de la Universidad de Coruña (UDC) por permitirme disponer de cuantos medios e infraestructuras he necesitado, y a Ana Rodríguez Fraga, técnico de la Unidad de Geocronología de los SAI, por su predisposición y la organización del laboratorio de Luminiscencia y Cosmogénicos.

Como no, dar las gracias a Aurora, Ana, Amalia, Isa, y Laura, porque da gusto trabajar en un ambiente tan agradable, y a los compañeros espeleólogos del club CETRA, que nos llevan de excursión.

Al Dr. Willem Vieveen, que nos acompañó a ver algunos de los depósitos fluviales del río Mero, aportando su sabiduría y experiencia. Por cierto, todo esto empezó con sus Pesqueiras del río Miño en Chan de Vide (Pontevedra), que me engancharon a la luminiscencia y que adopté, además, como Trabajo de Fin de Máster.

Quisiera agradecer a Alicia Carballal (de Sarria) y Artur-Enrique Bahleiro Tadiotto, compañeros del máster, y a Alexandre Vázquez Rodríguez, también compañero del IUX, por su ayuda con los sistemas de información geográfica y con los programas para su procesado. Gracias también a QSIG software libre.

Me gustaría dar las gracias también al Dr. Alberto Núñez Cardezo, de la Unidad de Análisis Estructural de los SAI, por su ayuda y paciencia al explicarme los resultados de los análisis de fluorescencia y difractogramas, y por acompañarme a tomar unos brebajes nacionales e internacionales después de largas jornadas de trabajo - e intentar aprender al fútbol- con mis amigos del Escorial, de Tempo Novo-Relámpago de Elviña y de los furanchos de Nabis y de Elena. Gracias a vosotros también, que me habéis hecho más llevadera mi estancia en Elviña a lo largo de estos años.

Gracias a Nani y a Neka por acompañarme en los paseos vespertinos alrededor del Castro de Elviña y a Josiño y Emilio por sus paellas revitalizantes, indispensables para afrontar una nueva jornada con la moral bien alta.

Y por su puesto, dar las gracias a Sonia Ferrín Brocos por sus ánimos, su ayuda con las correcciones y su paciencia, soportando mis momentos de enajenación e irritabilidad. A decir verdad, conmigo en todo momento.

Me considero muy afortunado y por eso os doy las gracias a todos.



## Resumen

La aplicación y desarrollo de la técnica de datación absoluta por luminiscencia durante de los últimos años ha permitido conocer el tiempo de enterramiento de sedimentos a lo largo del Holoceno y el Pleistoceno Superior, dentro del propio límite de la técnica, de unos 150 o 200ka para la señal OSL a partir de granos de cuarzo, y de 500ka o más para la señal pIR-IRSL, extraída a partir de granos de feldespato. Estas señales se generan por la redistribución de cargas a través de la red cristalina de los granos de los minerales debido a la radiación natural que incide sobre los mismos dentro del sedimento, hasta un nivel de saturación que no permite alcanzar edades más antiguas de las mencionadas.

Existen una serie de condicionantes que deben ser considerados para aplicar el procedimiento de datación más adecuado. Por ejemplo, y a diferencia de lo que ocurre con sedimentos eólicos cuya señal de luminiscencia es bien blanqueada por la luz del sol al ser transportados por el viento antes de su deposición, los sedimentos de tipo fluvial pueden sufrir un blanqueamiento incompleto de la señal debido a las condiciones de turbidez del agua que los transporta antes de su deposición, que podría dar lugar a la presencia de una carga residual que se suma a la que se genera durante el tiempo de enterramiento y que podría tener como consecuencia una sobre-estimación de la edad.

Para este trabajo de tesis doctoral se han aplicado técnicas de luminiscencia en depósitos fluviales y eólicos, de edad desconocida hasta el momento, desarrollados en el margen atlántico del noroeste de la Península Ibérica. Esto ha permitido poner a prueba la aplicación de la técnica y ampliar el conocimiento de la evolución costera en esta región durante las últimas etapas glaciales e interglaciales del Cuaternario. Con esta finalidad se han seleccionado algunos de los depósitos fluviales costeros desarrollados en el curso bajo de la cuenca del río Mero (A Coruña, Galicia, España) y en la desembocadura del río Ulla a la altura de Catoira (Pontevedra, Galicia España), así como algunos de los afloramientos correspondientes a antiguas dunas presentes a lo largo de la fachada atlántica de Galicia en las provincias de A Coruña y Pontevedra.

## Resumo

A aplicación e desenvolvemento da técnica de datación absoluta por luminescencia nos últimos anos permitiu coñecer o tempo de enterramento de sedimentos durante o Holoceno e o Pleistoceno Superior, dentro dos límites da técnica, de uns 150 ou 200ka para o sinal OSL a partir de grans de cuarzo, e de 500ka ou máis, para o sinal pIR-IRSL de feldespatos. Estes sinais son xerados por a redistribución de cargas a través da rede cristalina dos grans dos minerais debido a radiación natural que incide sobre os mesmos dentro do sedimento, até un nivel de saturación que non permite atinxir idades mais antigas das mencionadas.

Existen unha serie de condicionamentos que deben ser considerados para aplicar o procedemento de datación mais axeitado. Por exemplo, ao contrario do que acontece cos sedimentos eólicos, cuxa sinal de luminescencia é ben branqueada pola luz solar cando son transportado polo vento antes da súa deposición, os sedimentos de tipo fluvial poden sufrir un branqueamento incompleto do sinal debido as condicións de turbidez da auga que os transporta antes da súa deposición, que podería levar á presenza dunha carga residual herdada que é engadida a aquela xerada durante o tempo de enterramento, e que resultaría nunha sobre-estimación da idade.

Para este traballo de tese de doutoramento aplicaranse técnicas de luminescencia en depósitos fluviais e eólicos desenvolvidos, de idade descoñecida ate o de agora, na marxe atlántica da Península Ibérica. Isto permitiu por a proba a aplicación da técnica e ampliar o coñecemento da evolución da costa nesta rexión o longo dos últimos estádios glaciais e interglaciais do Cuaternario. Para este fin foron seleccionados algúns dos depósitos fluviais costeiros desenvolto no curso baixo da bacía do río Mero (A Coruña, Galicia, España) e na desembocadura do río Ulla na localidade de Catoira (Pontevedra, Galicia, España), así como algúns dos afloramentos correspondentes a antigas dunas presentes o longo da fachada atlántica de Galicia, nas provincias de A Coruña e Pontevedra.

## Abstract

The use and development of the technique of absolute dating by luminescence over the last years has allowed to know the burial time of sediments along the Holocene and the Upper Pleistocene, within the limits of the technique, up to 150 or 200ka for the OSL signal from quartz grains, and 500 ka or more, for the pIR-IRSL signal from feldspars. Those signals are generated through crystal-lattice charge redistribution in mineral grains due to their exposure to natural radiation within sediments, until a saturation level that does not allow reaching older ages than referred above.

There exist a number of constraints that must be considered in order to apply the most appropriate dating procedure. For instance, and unlike what happens in aeolian sediments whose luminescence signal is completely-bleached by sunlight during wind transport before deposition, fluvial sediments can overcome incomplete bleaching of the luminescence signal due to turbidity conditions of the water transporting them prior to their deposition, which could lead to the presence of an inherited residual charge added to these generated during the burial time and which would result in an age overestimation.

In this PhD. Thesis, luminescence techniques were applied in fluvial and aeolian sediments of unknown age until now, developed in the Atlantic margin of the Northwest of the Iberian Peninsula. This allowed to test the technique as well as to increase the knowledge of the coastal evolution in this region during the last glacial and interglacial Quaternary phases. To this end, some of the coastal-fluvial deposits developed in the lower Mero river basin (A Coruña, Galicia, Spain) and the mouth of the Ulla river at Catoira (Pontevedra, Galicia, Spain) have been selected, as well as some outcrops corresponding to ancient dunes along the Atlantic coastline of Galicia in the provinces of A Coruña and Pontevedra.





## ÍNDICE

### 1. Introducción y

objetivos.....	27
1.1. Introducción .....	27
1.2. Objetivos .....	31
1.3. Bibliografía .....	32
2. Descripción y antecedentes de los depósitos fluviales y la serie eólica datada.....	37
2.1. Descripción geográfica de la cuenca del río Mero.....	37
2.2. Características de los depósitos fluviales de la cuenca del río Mero: antecedentes.....	41
2.3. Descripción geológica de los depósitos fluviales del río Ulla en de Catoira .....	49
2.4. Serie eólica: Introducción y antecedentes.....	51
2.5. Bibliografía.....	56
3. Principios de luminiscencia y señal OSL.....	63
3.1. Introducción histórica .....	63
3.2. Principios de Luminiscencia.....	65
3.2.1 Modelo físico trampa-hueco ( <i>trap-hole</i> ).....	66
3.3. La señal de luminiscencia OSL.....	68
3.4. Estimación de la dosis equivalente .....	71
3.4.1. Dosis equivalente y cálculo de la edad de enterramiento .....	71
3.4.2. Método regenerativo y curva de dosis-respuesta.....	72
3.4.3. Descripción del protocolo SAR para OSL.....	74
3.4.3.1. Tratamientos térmicos.....	76
3.4.3.2. Señal de normalización: <i>Test-dose</i> .....	76
3.4.3.3. Test de Recuperación y Reciclaje.....	77
3.4.3.4. Blanqueamiento de la señal OSL.....	78
3.4.4. <i>Dose-recovery test</i> .....	80
3.5. Bibliografía.....	81
4. Tasa de radiación natural ionizante o <i>Dose-Rate (DR)</i> .....	85
4.1. Introducción a la tasa de radiación ionizante ( <i>DR</i> ).....	85
4.2. Fuentes de radiación.....	86
4.2.1. Cadenas de desintegración radiactiva.....	87
4.2.1.1 Desintegración radiactiva e isótopos inestables.....	88
4.2.1.2 Equilibrio secular.....	89
4.2.1.2.1. Factores desencadenantes de desequilibrio radiactivo.....	90

4.2.1.3 Otras fuentes de variación de la ( <i>DR</i> ).....	92
4.2.1.3.1 Radiación beta: microdosimetría y heterogeneidad en el sedimento y factores de atenuación en granos de cuarzo.....	92
4.2.1.3.2 Radiación alfa.....	93
4.2.1.3.3 Contenido en agua y su efecto en la <i>DR</i> .....	94
4.3. Radiación cósmica.....	95
4.4. Determinación de la tasa de radiación natural del medio y factores de conversión.....	97
4.5. Bibliografía .....	99
5. Incertidumbre en la señal OSL y modelos de edad.....	105
5.1. Tipos de error y factores de dispersión.....	105
5.1.1. Variaciones en el número de cuentas y magnitud de la dosis.....	106
5.1.2. Blanqueamiento incompleto de la señal.....	107
5.2. Estadística aplicada a luminiscencia (OSL e IRSL).....	108
5.2.1. Cálculo de la señal integrada y su incertidumbre.....	108
5.2.2. Modelo de ajuste exponencial+lineal.....	109
5.2.3. Estudio de la varianza.....	110
5.2.4. Modelos de edad desarrollados para la estimación de la <i>De</i> .....	111
5.2.4.1. Modelos de edad central (CAM).....	111
5.2.4.2. Modelos de edad mínima (MAM).....	112
5.2.4.3. Método de estimación IEU.....	113
5.3. Distribución de datos.....	115
5.3.1. Análisis de la dispersión y gráficos de distribución.....	115
5.4. Bibliografía .....	117
6. Señal IRSL y pIR-IRSL de feldespatos.....	121
6.1. Atenuación anómala de la señal IRSL ( <i>anomalous fading</i> ).....	121
6.2. Modelos físicos propuestos para la señal IRSL.....	123
6.2.1. Modelos de trampa única y múltiple.....	123
6.2.2. Señal IRSL y modelo de bandas de estados energéticos.....	124

6.3. Protocolo SAR modificado para feldespato y la señal pIR-IRSL.....	126
6.4. Test de atenuación y modelo de corrección.....	127
6.5. Radiación interna en feldespato potásico.....	127
6.6. Bibliografía .....	129
7. Material y métodos.....	133
7.1. Trabajo de campo.....	133
7.1.1. Muestras MPK: cuenca del río Mero y península de Sada.....	133
7.1.2. Localización y muestreo de los depósitos fluviales del río Ulla .....	143
7.1.3. Muestras correspondientes a la serie eólica de la fachada atlántica gallega.....	147
7.2. Metodología para la extracción de muestras.....	155
7.3. Métodos físicos y químicos para la extracción y purificación de minerales.....	159
7.3.1. Tamizado y contenido en agua de las muestras.....	159
7.3.2. Purificación de minerales.....	160
7.3.2.1. Purificación de la fracción gruesa de cuarzo.....	160
7.3.2.2. Purificación de la fracción gruesa de feldespato potásico.....	161
7.3.2.3. Extracción de la fracción fina de feldespato.....	162
7.4. Humedad y saturación.....	162
7.5. Preparación de muestras para analizar mediante espectrometría gamma de alta resolución.....	163
7.6. Equipo y métodos empleados en luminiscencia OSL e IRSL.....	163
7.6.1. Equipo de luminiscencia y preparación de alícuotas.....	163
7.6.2. Test de contaminación del cuarzo.....	169
7.6.3. Test de <i>pre-heat</i> .....	169
7.6.4. Protocolo SAR.....	170
7.6.5. Test de <i>Dose-recovery</i> .....	172
7.6.6. Test de blanqueamiento de la señal ( <i>Bleaching test</i> ).....	172
7.6.7. Dosis estimada en función del tamaño de alícuota.....	173
7.6.8. Protocolo SAR modificado para feldespato: señal pIR-IRSL.....	173

7.6.9. Test de atenuación de la señal pIR-IRSL ( <i>fading test</i> ).....	174
7.6.10. Determinación de los intervalos de tiempo de la señal OSL y pIR-IRSL rápida y su señal de fondo.....	175
7.7. Bibliografía .....	176
8. Resultados.....	181
8.1. Resultados para los depósitos fluviales: muestras MPK y ABC.....	182
8.1.1. Tasa de radiación natural ionizante ( <i>DR</i> ).....	182
8.1.1.1. Radiación terrestre: actividad de los radioisótopos uranio, torio y potasio...	182
8.1.1.2. Humedad y saturación: porcentaje en agua y atenuación de la <i>DR</i> .....	183
8.1.1.3. Componentes de la <i>DR</i> y estimación de la <i>DR</i> <sub>TOTAL</sub> .....	184
8.1.2. Características de la señal OSL para las muestras MPK y ABC .....	186
8.1.2.1. Intensidad de la señal OSL.....	186
8.1.2.2. Curva de caída y curva de crecimiento.....	197
8.1.2.3. Error absoluto y error relativo.....	201
8.1.2.4. Señal OSL del <i>Test-dose</i> .....	209
8.1.2.5. Test de <i>Pre-heat</i> .....	216
8.1.2.6. Test de adecuación del protocolo SAR: <i>Dose-recovery test</i> .....	222
8.1.2.7. Test de blanqueamiento de la señal OSL: <i>Bleaching test</i> .....	223
8.1.2.8. Tamaño de alícuota y variabilidad de las estimaciones.....	231
8.1.3. Sobre-dispersión: valores y correlación con la <i>DR</i> .....	241
8.1.3.1. Sobre-dispersión, tasa de radiación total y su componente beta.....	242
8.1.4. Estimación de la proporción de potasio mediante FRX para las muestras MPK.....	244
8.1.5. Análisis granulométrico para las muestras MPK y ABC.....	249
8.1.5.1. Fracciones granulométricas para las muestras MPK.....	249
8.1.5.2. Granulometría y relación con la <i>DR</i> , con el porcentaje de <i>OD</i> y con la proporción de potasio para las muestras MPK.....	251
8.1.5.3. Granulometría y relación con la <i>DR</i> con y la de <i>OD</i> para las muestras ABC....	254
8.1.6. Estimación de la dosis equivalente ( <i>De</i> ) y rango de edad.....	257

8.1.6.1. Distribución de los datos y pruebas de normalidad.....	257
8.1.6.2. Consideraciones generales en la estimación de la <i>De</i> .....	268
8.1.6.3. <i>De</i> estimada y rango de edad para las muestras MPK1, MPK2, MPK3, MPK4, MPK5, MPK6, MPK7 y MPK.....	273
8.1.6.4. <i>De</i> y rango de edad para las muestras ABC1, ABC2, ABC3 y ABC4.....	290
8.1.6.5. Rango de edad estimado por cada modelo empleado (CAM, MAM e IEU)....	302
8.1.7. Señal pIR-IRSL para grano grueso y fracción fina.....	305
8.2. Resultados para la Serie Eólica.....	308
8.2.1. Tasa de radiación natural ionizante ( <i>DR</i> ).....	308
8.2.1.1. Actividad de los radioisótopos de uranio, torio y potasio.....	308
8.2.1.2. Humedad y saturación.....	309
8.2.1.3. Componentes de la <i>DR</i> y estimación de la <i>DR</i> <sub>TOTAL</sub> .....	310
8.2.2. Características de la señal OSL y pIR-IRSL para la serie eólica.....	312
8.2.2.1. Señal natural OSL (y pIR-IRSL) y normalizada ( $L_x/T_x$ ).....	312
8.2.2.2. Curva de caída y curva de crecimiento.....	317
8.2.2.3. Error absoluto y error relativo.....	319
8.2.2.4. Señal natural del <i>test-dose</i> ( $T_x$ ).....	324
8.2.2.5. Test de <i>pre-heat</i> .....	328
8.2.2.6. <i>Dose-recovery test</i> .....	331
8.2.3. Estimación <i>De</i> y rango de edad.....	331
8.2.3.1. Estimación de la <i>De</i> para la señal OSL.....	334
8.2.3.2. Estimación de la <i>De</i> para la señal pIR-IRSL .....	342
9. Discusión.....	347
9.1. Tasa de radiación natural, señal OSL y rango de edad para los depósitos fluviales (MPK y ABC)...	349
9.1.1. Tasa de radiación natural del medio ( <i>DR</i> ).....	350
9.1.1.1. Equilibrio secular y desequilibrio radiactivo.....	353
9.1.1.2. Estimación del contenido en agua durante el tiempo de enterramiento.....	353



9.1.1.3. Tasa de radiación natural DR y relación con la sobre-dispersión.....	354
9.1.2. Señal OSL para las muestras de la cuenca del río Mero y península de Sada.....	356
9.1.2.1. Señal natural OSL.....	356
9.1.2.2. Curva de Caída de la señal OSL y métodos de integración.....	358
9.1.2.3. Error absoluto y error relativo.....	360
9.1.2.4. Señal OSL del <i>Test-dose</i> y estimación de la <i>De</i> .....	360
9.1.3. Estimaciones individuales: distribución y modelos de edad.....	361
9.1.4. Selección del modelo de edad y rango de edad para los depósitos fluviales analizados...	364
9.1.5. Aspectos geodinámicos y rangos de edad para los depósitos fluviales analizados.....	366
9.2. Serie eólica.....	372
9.2.1. Tasa de radiación anual y desequilibrio radiactivo.....	373
9.2.2. Estimación de la <i>De</i> y rango de edad para la serie eólica.....	373
9.2.2.1. Muestras Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3).....	374
9.2.2.2. Muestra Mortaza.....	375
9.2.2.3. Muestras Tal y Xalfas.....	375
9.2.2.4. Muestras Bornalle, Corme, Cíes-Lagoa dos Nenos y Punta Langosteira.....	376
9.2.2.5. Rango de edades finales para la serie eólica.....	377
9.2.2.6. Correlación entre la serie eólica datada y las curvas climáticas globales.....	378
9.3. Aspectos geodinámicos asociados a los depósitos fluviales y la serie eólica .....	380
9.4. Bibliografía .....	386
10. Conclusiones.....	397
10.1. Aplicación de la técnica de luminiscencia OSL y pIR-IRSL para los depósitos fluviales.....	397
10.2. Aplicación de la técnica de luminiscencia OSL y pIR-IRSL para los depósitos eólicos.....	398

## Capítulo 1.

### Introducción y objetivos.



## 1. Introducción y objetivos

### 1.1. Introducción.

Desde hace aproximadamente 250 millones de años, que es cuando finalizan las secuelas de la orogenia hercínica en el Mundo, el territorio que actualmente conforma Galicia (NO de la Península Ibérica) estuvo emergido lo cual explica la total ausencia de sedimentos o rocas de edad cenozoica que la caracteriza. Es solamente en el Cenozoico (Oligoceno) cuando comienzan a tener representación las rocas y/o sedimentos, y aún así, de escasa magnitud. Es el caso de los depósitos sedimentarios asociados a las cuencas tectónicas de edad terciaria y ya, a medida que nos acercamos al momento actual, a los depósitos lacustres se unen los depósitos fluviales, litorales y eólicos aunque con una representación testimonial en superficie. Por tanto es la erosión, al estar situada Galicia por encima del nivel del mar, la única responsable del desmantelamiento del relieve y de la ausencia de conservación de sedimentos o rocas sedimentarias (Ribeiro, 2002; Vidal-Romaní, 2002; Grobe, 2014; Vidal-Romaní, 2016). En Geología casi siempre son necesarios sedimentos o rocas para reconstruir la historia de una zona determinada. Algunas veces, sin embargo y con la ayuda de los isótopos cosmogénicos terrestres y la geomorfología es posible reconstruir la historia geológica de la Tierra aunque no disponer de sedimentos o rocas eleva la dificultad hasta límites insuperables. Por poner un ejemplo aplicado a Galicia, la historia geológica del glaciario pleistoceno, al menos para los últimos 500.000 años, ha sido resuelta con ayuda de la geomorfología y la datación de superficies erosivas con isótopos  $^{21}\text{Ne}$  y  $^{10}\text{Be}$  (Fernández-Mosquera, 2002), aunque esta es una rara excepción a las dificultades de reconstruir una historia geológica sin rocas o sedimentos. Estas circunstancias ayudan a explicar la fragmentación de la información geológica en Galicia durante el intervalo del tiempo, esencialmente todo el Mesozoico, afectado por el hiato erosivo antes mencionado.

Como antes se dijo el estudio del Cenozoico (Terciario y Cuaternario) se ha visto limitado por la pobreza de depósitos o rocas y que representan a ambientes exógenos específicos ya continentales (glaciares, fluviales, cársticos y pseudocársticos, lacustres) ya marinos o mixtos (de playa, eólicos, de lagún, etc.). Todos estos depósitos, con una representación areal muy exigua, cubren un intervalo temporal que va desde el Oligoceno - muro de la laguna de As Pontes (A Coruña, Galicia)- hasta la actualidad. Para mayor dificultad en la mayor parte de los casos estos depósitos y rocas son de naturaleza siliciclástica lo que limita enormemente la posibilidad de obtener datos cronológicos absolutos, y por tanto de reconstruir adecuadamente la historia geológica correspondiente a este intervalo temporal que solo se ha podido comenzar a realizar con eficiencia mediante el uso de técnicas de datación absoluta adecuadas a la edad hipotética de los depósitos, como la luminiscencia OSL o IRSL, o núclidos cosmogénicos terrestres ( $^{10}\text{Be}$ ) u otras como la de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ), aunque el límite de edad de ésta última técnica de datación, aplicada a restos orgánicos o carbonatos, no sobrepasa los últimos 50ka años. A las anteriores dificultades se suma el proceso de destrucción que sufren la mayoría de estos registros geológicos, ya sea por causas naturales, como por ejemplo el ascenso del nivel del

mar durante los últimos 15000 años, o forzada por el desarrollo de las poblaciones humanas y el aumento de la explotación de los recursos naturales, si bien, en algunas ocasiones y paradójicamente, es la propia actividad humana la que deja al descubierto depósitos de naturaleza variada, como por ejemplo dunas fósiles, niveles marinos o sedimentos fluviales que han permanecido ocultos y tapizados por una densa vegetación.

Otro aspecto importante hace referencia a la ausencia de registro fósil en la mayor parte del territorio gallego debido a los procesos erosivos desarrollados durante millones de años (Vidal Romaní, 1978) y el carácter ácido del medio debido a los materiales de partida -mayoritariamente graníticos- y que dificultan cualquier modo de conservación, a excepción de algunas zonas puntuales de naturaleza calcárea a lo largo de la franja este del territorio, como, por ejemplo, los sistemas cársticos reconocidos en la Sierra del Caurel o en Eirós (Lugo; Galicia; NO de la Península Ibérica), etcétera. En algunos de los estudios paleontológicos realizados en Galicia de distintos macro-vertebrados como el oso cavernario (*Ursus spelaeus*) (Grandal-D'Anglade, 1993; 1997), el ciervo común (*Cervus elaphus*) (López-González, 2001), el oso pardo (*Ursus arctos*) (García-Vázquez, 2015) o el uro (*Bos primigenius*) (Vidal-Gorosquieta, 2016), entre otros, se han incluido dataciones de los restos fósiles mediante radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ -AMS) y, en algunos casos, dataciones de espeleotemas mediante U/Th (Grandal-D'Anglade et al., 2006). Estos datos cronológicos han permitido asignar la fauna a un tiempo dado (p.ej.: el extinto oso cavernario sufre un declive genético 25ka antes de su extinción (Stiller et al, 2010), o la aparición de restos en Enciña da Lastra (Ourense; Galicia) hace unos 19ka (Grandal-D'Anglade et al., 2006), aportando una información muy valiosa para determinar los desplazamientos de hábitat acontecidos (Grandal-D'Anglade et al., 2006; García-Vázquez et al, 2011; García-Vázquez, 2016; Rey-Iglesia et al., en prensa), o desarrollar su filogeografía acompañándose de análisis de ADN(m) (Fortes et al., 2016).

A estos estudios se suman las dataciones del glaciario en Galicia a partir de núclidos cosmogénicos terrestres (Fernández-Mosquera, 2002; Vidal-Romaní et al., 2015) y que han permitido una mejor comprensión de la evolución del clima a escala local, reforzado, a su vez, con el análisis y datación de los espeleotemas desarrollados en algunos de estos sistemas de cuevas (Serra do Caurel; Lugo; Galicia), cubriendo el registro climático local de los últimos 500ka (Railsback et al., 2017). Resulta, por tanto, obvio la importancia de la aplicación de las técnicas de datación absoluta en los distintos registros, para “armar el rompecabezas” geológico, como expresaría el profesor y catedrático D. Juan Ramón Vidal-Romaní en su discurso de ingreso como académico numerario de la RAGC el 25 de Marzo del 2015.

Respecto al último gran episodio del modelado relieve de Galicia, marcado por las oscilaciones glacio-interglaciales acontecidas durante el Cuaternario, se produce un importante desarrollo de procesos geodinámicos externos en el borde costero, marinos, fluviales y eólicos, motivados por el aumento o desaparición de las masas de hielo glaciar (glacio-eustasia) entre otros aspectos, y que han generado variaciones en la línea de costa así como en las principales redes de drenaje (Vidal Romaní, 2002), si bien, procesos internos, como el levantamiento de la litosfera en el margen occidental gallego (Viveen, 2013)

también han ejercido su influencia. Así, dentro de la unidad superior desarrollada en el borde costero-plataforma continental en Galicia se pueden diferenciar depósitos en ambientes sumergidos y emergidos. En los primeros, los depósitos pleistocenos no se aprecian claramente en los registros sísmicos submarinos (Acosta y Herranz 1984; Brongersma y Pannekoek, 1996) y las dataciones realizadas son escasas (Margalef, 1956; 1959), estando mejor representados y estudiados los depósitos holocenos. Estos últimos, más continuos, predominan en las zonas interna y media de la plataforma con un espesores que no supera los 10m, y han permitido definir, entre otros aspectos, una secuencia zonal sobre las que se localizan dos niveles continentales fosilizados por dos niveles marinos (Mosquera-Santé, 2000) -si bien, a partir de los niveles marinos fósiles emergidos, escasos, azoicos y sin datar, se han construido cuadros generales de las oscilaciones eustáticas a lo largo del Cuaternario sin fundamentos basados en estudios fósiles o dataciones absolutas (Vidal-Romani, 2002), como es el caso de Nonn, (1996).

Por otra parte, los afloramientos pleistocenos y holocenos en superficie aparecen de manera muy dispersa y con una escasa entidad, estando representados por niveles marinos y fluviales colgados de carácter discontinuo y azoico (Nonn, 1966; Butzer, 1967; Nieto y Vidal-Romani, 1989), situados entre +60m y +20m (snma) y sobre los que se ha empleado únicamente criterios de datación altitudinal, relativa y poco fiable. Únicamente el reciente estudio del sistema de terrazas del Baixo-Miño realizados por Viveen (2012; 2013) incluye una serie completa de dataciones absolutas ( $^{10}\text{Be}$ ; OSL y pIR-IRSL).

Respecto a la serie eólica distribuida por toda la costa gallega ha sido estudiada superficialmente hasta hace una década (Gutiérrez-Becker, 2008), contando con escasas dataciones absolutas. Además, su origen ha sido considerado frecuentemente como marino (Devoey et al., 1996, Alonso y Pagés, 2000) aunque re trabajado posteriormente por el viento, asociándose genéricamente a la transgresión finí-holocena, si bien, en la actualidad, ya se consideran como depósitos exclusivamente eólicos y relacionados con las distintas etapas marinas regresivas a lo largo del Cuaternario (Vidal-Romani, 1974; Vidal-Romani, 2002).

Es por todo ello por lo que la aplicación de técnicas de datación absoluta resulta una herramienta imprescindible para la reconstrucción de cualquier modelo geomorfológico y/o ambiental, siendo precisamente en este aspecto en donde la actividad realizada por el Instituto Universitario de Xeoloxía “Isidro Parga Pondal” (IUX) ha resultado de vital importancia, al aplicar el tiempo, el esfuerzo e inversiones necesarias para desarrollar las unidades de dataciones por cosmogénicos terrestres y de luminiscencia (TL, OSL e IRSL) en las dos últimas décadas. A ello hay que incluir la aplicación metódica de estas técnicas para cada uno de los registros estudiados y dados, huyendo del dato numérico puntual e inconexo a favor de un análisis más completo (asumiendo las propias y variadas limitaciones) del cual extraer una información que ayude a comprender la evolución del medio, siendo este es el propósito principal del presente trabajo con respecto a algunos de los depósitos fluviales y eólicos desarrollados a lo largo de la costa de Galicia (NO de la Península Ibérica).

Los materiales empleados en esta Tesis doctoral para su datación pertenecen a sedimentos fluviales, por una parte, y de origen eólico, por otra. Respecto a los primeros, y en base a criterios geomorfológicos, se han seleccionado una serie de depósitos desarrollados a distinta cota en la cuenca del río Mero, sistema fluvial que da origen a la Ría de Coruña (Galicia; España), y cuya morfología ha sido bien estudiada anteriormente (Nonn, 1966; Escuer-Sole y Vidal-Romaní, 1987). Para estos depósitos se proponían procesos de formación acontecidos en el Villafranquiense, en base a criterios como el color rojizo de los mismos (Nonn, 1966). Posteriormente, a medida que se estudiaban más en detalle, estas dataciones relativas iban perdiendo consistencia (Vidal Romaní, 1979; Escuer-Solé y Vidal Romaní, 1987) si bien, la aplicación de técnicas absolutas resultaba, por aquel entonces, un imposible -por cuestiones metodológicas relativas al desarrollo de la OSL como herramienta de datación- siendo de gran interés completar su estudio con dataciones absolutas. También se aplicará la técnica de datación para algunos de los depósitos fluviales ubicados en el curso bajo del Río Ulla, cuyo sistema fluvial da origen a la Ría de Arousa (Galicia; España), así como para algunos de los depósitos de origen eólico desarrollados a lo largo de la costa atlántica de Galicia (NO de la Península Ibérica) y cuya morfología también ha sido caracterizada anteriormente (Gutiérrez-Becker, 2008). Así, la aplicación de las técnicas de luminiscencia OSL e IRSL ofrecería referencias cronológicas para cubrir la ausencia de dataciones absolutas durante esta etapa del Cuaternario, siempre que no se supere el límite máximo de edad de la técnica, entre 150-200ka para la OSL y hasta 500ka o más para IRSL, (Sanjurjo-Sánchez y Vidal-Romaní, 2013).

Algunos de estos aspectos y otros relacionados con la propia técnica de datación, se irán desglosando y desarrollando a lo largo del presente trabajo. Después de este primer capítulo introductorio en donde resalta la importancia de la aplicación de las técnicas de datación absoluta, en el segundo capítulo se describirán los antecedentes y las características geológicas y geomorfológicas más relevantes respecto al uso de la técnica de datación empleada, de los depósitos fluviales desarrollados en la cuenca del Río Mero-Península de Sada (A Coruña, Galicia), de los depósitos del Río Ulla a su paso por la localidad de Catoira (Pontevedra; Galicia) y de la serie eólica desarrollada a lo largo de la costa atlántica gallega (NO de la Península Ibérica). En el capítulo tercero se describirán los principios fundamentales de la técnica de datación mediante luminiscencia OSL desarrollada para granos de cuarzo, incluyendo una breve introducción histórica, alguno de los modelos físicos más aceptados, las características más representativas de la señal de luminiscencia OSL, su origen y los protocolos desarrollados para obtener una estimación del tiempo de enterramiento. En el capítulo cuarto, se describirán los aspectos relacionados con la radiación natural y la tasa de radiación anual, siendo este último un parámetro imprescindible para el cálculo de la edad, incluyendo la fuentes de radiación, su estimación y las fuentes de variación existentes. En el capítulo quinto se desarrollarán los aspectos relacionados con la incertidumbre asociada a la técnica, su origen y los modelos de edad desarrollados. En el capítulo sexto se explicarán los principios fundamentales de la técnica de datación mediante luminiscencia IRSL y su variante pIR-IRSL para feldespatos, incluyendo aspectos como la atenuación anómala de la señal IRSL o como afecta la

auto-irradiación de los feldespatos a la tasa de radiación anual. En el capítulo séptimo, se describirán los materiales y la metodología aplicada en el trabajo de campo y en el laboratorio, incluyendo los procesos físicos, químicos y técnicos, para pasar a describir los resultados en el capítulo octavo. En el capítulo noveno se procederá a la discusión de aspectos como la intensidad y comportamiento de la señal OSL y pIR-IRSL, la distribución de los datos y la selección del modelo de edad más adecuado, así como los aspectos geodinámicos asociados a los rangos de edad estimados, tanto para los depósitos fluviales como para la serie eólica datada. Por último, en el capítulo décimo se establecerán las conclusiones pertinentes.

### 1.2. Objetivos.

El objetivo principal de la presente tesis es la datación y ubicación en el tiempo de los depósitos fluviales próximos a la costa desarrollados en la cuenca del río Mero y algunos de los depósitos de naturaleza similar encontrados en el curso bajo del río Ulla a su paso por la localidad de Catoira a partir de la técnica de datación por OSL, incluyendo también la aplicación de esta técnica y de la técnica de datación mediante luminiscencia pIR-IRSL en los afloramientos pertenecientes a la serie eólica desarrollada a lo largo de la costa noroeste de la Península Ibérica, con la finalidad de asignar un rango de edad fiable que permita conocer el momento de su formación. Estas dataciones permitirían ampliar el conocimiento de la evolución y dinámica costera, tanto fluvial como eólica a escala local, y su posible correlación a escala regional y global con aquellos procesos externos implicados en el desarrollo de la misma, como son las variaciones climáticas y glacio-eustáticas a lo largo del Cuaternario, teniendo en cuenta, además, la implicación de procesos endógenos como el levantamiento tectónico que experimenta la costa gallega en la actualidad.

Por lo tanto, los objetivos de la tesis se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aplicación de las técnicas de datación absoluta OSL e IRSL (pIR-IRSL) en los depósitos fluviales de la cuenca del río Mero y la desembocadura del río Ulla, desarrollados sobre sustrato granítico y esquistoso, para analizar la señal de luminiscencia resultante.
- Aplicación de las técnicas de datación absoluta OSL e IRSL (pIR-IRSL) en los depósitos eólicos desarrollados a lo largo de la fachada atlántica gallega.
- Obtención de un rango de edad absoluta fidedigno para cada uno de los depósitos estudiados mediante dichas técnicas.
- Descripción de la dinámica fluvial costera para la cuenca del río Mero a partir del conjunto de edades obtenido y su correlación, si hubiere, con los datos obtenidos para los depósitos extraídos en el curso bajo del Río Ulla.
- Descripción de la dinámica eólica costera y su relación con las oscilaciones eustáticas a lo largo del rango de edad obtenido.



### 1.3. Bibliografía

- Acosta, J. y Herranz, P. (1984) Contribución al conocimiento del Cuaternario marino en la Ría de Muros y Noya. *Thalassas* 2, 13-21.
- Alonso, A.; Pagés, J.L. (2000) El registro sedimentario del final del Cuaternario en el NW de la Península Ibérica. Márgenes Cantábrico y Atlántico. *Revista de la sociedad geológica de España* 13, 17-29.
- Brongersma, L.D. & Pannekoek, A.J. (1996) Investigations in and around the Ria de Arosa, North-West Spain. *Leidse Geologische Mededelingen* 37, 1-5.
- Butzer, K. (1967) Geomorphology and stratigraphy of the paleolithic site of Budiño (Pontevedra, Spain). *Eiszeitalter und gegenwart* 18, 82-103.
- Devoy, R.J.N.; Delaney, C.; Carter, R.W.G. & Jennings, S.C. (1996) Coastal stratigraphies as indicators of environmental changes upon european coasts in the Late Holocene. *Journal of Coastal Research* 12, 564-588.
- Escuer-Sole, J.; Vidal-Romaní, J.R. (1987) Facies y modelo local de los depósitos aluviales de la cuenca del río Mero y península de Sada (A Coruña, Galicia, NW Spain). *Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 11, 69-83.
- Fernández-Mosquera, D. (2002) Geocronología de superficies graníticas mediante <sup>21</sup>Ne cosmogénico en cuarzo. Universidade da Coruña. Tesis doctoral. 280pp.
- Fortes, G.G.; Grandal-d'Anglade, A.; Kolbe, B.; Fernandes, D.; Meleg, I.; García-Vázquez, A.; Pinto-Llona, A.C.; Constantin, S.; Torres, T.J.; Ortiz, J.E.; Frischauf, C.; Rabeder, G.; Hofreiter, M. & Barlow, A. (2016) Ancient DNA reveals differences in behaviour and sociality between brown bears and extinct cave bears. *Molecular Ecology* 25, 4907-4918.
- García-Vázquez, A.; Vidal-Gorosquieta, A.; Grandal-d'Anglade, A.; Vaqueiro, M.; Vidal-Romaní, J.R. (2011) El clima holoceno a través de las paleodietas del oso pardo (*Ursus arctos*) y el uro (*Bos primigenius*). En: Adán Pérez-García, Francisco Gascó, José Miguel Gasulla, Fernando Escaso (Eds.): *Viajando a mundos pretéritos*. Ajuntament de Morella, Morella. 131-143.
- García-Vázquez, A. (2015) Caracterización del Oso Pardo (*Ursus arctos* L.) fósil en el NW de la Península Ibérica: datos morfométricos y moleculares. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña. 443 pp.
- García-Vázquez, A. (2016) Influence of growth and trophic level in bone collagen stable isotopes of *Ursus arctos* from Pyrenees (Spain). 1st International Meeting of Early-stage Researchers in Palaeontology. Libro de resúmenes, pp. 167. Alpuente (Valencia, España), 13-16 Septiembre, 2016.
- Grandal-d'Anglade, A. (1993) El oso de las cavernas en Galicia: el yacimiento de Cova Eirós. *Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Serie Nova Terra*, 8. 285 pp.
- Grandal-d'Anglade, A.; Vidal-Romaní; López-González, F. (1977) Condicionantes de la distribución de fauna de micromamíferos en el NW de la Península Ibérica. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 22, 43-66.
- Grandal-d'Anglade, A.; Vidal-Romaní, J.R.; Vaqueiro, M. & Méndez, E. (2006) O Rebolal. A new cave in Galicia (NW Spain) with recent cave bear remains: preliminary report. *Scientific Annals of the School of Geology Special volume* 98, 173- 177.
- Grobe, R.W.; Álvarez-Marrón, J.; Glasmacher, U.A.; Stuart, F.M. (2014) Mesozoic exhumation history and palaeolandscape of the Iberian Massif in Eastern Galicia from apatite fission-track and (U+Th)/He data. *International Journal of Earth Science* 103, 539-561.
- Gutiérrez-Becker, L. (2008) Caracterización de los sistemas dunares costeros del NW ibérico y su evolución durante el Cuaternario. Universidad de Coruña. Tesis doctoral. 283pp.
- López González, F. (2001) Biogeografía y dinámica de la fauna de macromamíferos pleistocenos de Galicia: el yacimiento de Liñares. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña

Margalef, F. (1956) Oscilaciones del clima postglacial del Noroeste de España registradas en los sedimentos de la Ría de Vigo. *Zephyrus* 7, 5-9.

Margalef, F. (1959) Nuevos datos para el estudio de la historia de la Ría de Vigo desde la última glaciación. *Memoria de la Real Academia de Ciencias i Arts de Barcelona, IIIª Época. Nº 666, vol 33, nº2.*

Mosquera-Santé, M.J (2000) Evolución post-glaciación del nivel del mar en el NO de la Península Ibérica: El caso del golfo Ártabro. Universidad de A Coruña. Tesis doctoral. 172pp.

Nieto, M.I.; Vidal-Romaní, J.R. (1989) Niveles marinos y depósitos continentales antiguos en el borde costero entre Cabo Prior y Cabo Prioriño (A Coruña, Galicia, España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 14, 67-78.

Nonn, H. (1966) Les régions cotières de la Galice (Espagne). Etude géomorphologique. Publications de la Faculté des lettres de L'Université de Strasbourg. Foundation Baulig. Tomo III. 591 pp.

Railsbak, L.B.; Liang, F.; Vidal-Romaní, J.R.; Garret, K.B.; Sellers, R.C.; Vaquero-Rodríguez, M.; Grandal-D'Anglade, A.; Cheng, H.; Edwards, R.L. (2016) Radiometric, isotopic, and petrographic evidence of changing interglacials over the past 550,000 years from six stalagmites from the Serra do Courel in the Cordillera Cantábrica of northwestern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 466, 137–152.

Rey-Iglesia, A., Grandal-d'Anglade, A., Campos, P.F., Hansen, A.J. (en prensa) Mitochondrial DNA of Pre-Last Glacial Maximum red deer (*Cervus elaphus*) from Liñares cave (NW Spain) suggest a more complex phylogeographical history for the species. *Ecology and Evolution* (submitted).

Ribeiro, A. (2002) Soft plates and impact tectonics. Springer Verlag. 324pp.

Sanjurjo-Sánchez, J. y Vidal Romaní, J.R. (2013) Problemas y nuevos procedimientos de datación por OSL para los sedimentos litorales del NO de la Península Ibérica. VII Jornadas de Geomorfología Litoral, Oviedo, España. *Geotemas* 14, 47-50.

Stillier, M.; Baryshnikov, G.; Bocherens, H.; Grandal d'Anglade, A.; Hilpert, B.; Münzel, S.; Pinhasi, R.; Rabeder, G.; Rosendahl, W.; Trinkaus, E.; Hofreiter, M. & Knapp, M. (2010) Withering away – 25,000 years of genetic decline preceded cave bear extinction. *Molecular Biology and Evolution* 27 (5), 975-978.

Vidal-Gorosquieta, A.; Grandal-d'Anglade, A.; Vaquero-Rodríguez, M.; Vidal-Romaní, J.R. (2016) Galician aurochs: a morphologic, metric and isotopic study. 1st International Meeting of Early-stage Researchers in Palaeontology. Libro de resúmenes, pp. 167. Alpuente (Valencia, España), 13-16 Septiembre, 2016.

Vidal- Romaní, J.R. (1974) Sedimentos marinos antiguos en la costa de A Coruña. Trabajo inédito. Depósito del Laboratorio Xeolóxico de Laxe.

Vidal-Romaní, J.R. (1978) El periodo Cuaternario en Galicia. *Gallaecia* 3/4 Separata.

Vidal-Romaní, J.R.; Pérez-Alberti, A.; Grajal, M. (1979) Testimonios de climas semiáridos en el Cuaternario de Galicia. En: *Actas de la 3ª reunión nacional. Grupo Español de trabajo del Cuaternario. El Cuaternario en medios semiáridos. Inst. Geog. Aplic. C.S.I.C. Madrid.*

Vidal-Romaní, J.R. (2002) Relieve actual de Galicia. En: *Galicia. Naturaleza. Tomo XXXVI: Historia Natural. Geología. Hércules de Ediciones, S.A.. Capítulo 6; pp.: 304-341.*

Vidal-Romaní, J.R.; Fernández-Mosquera, D.; Martí, K. (2015) The glaciation of Serra de Queixa-Invernadoiro and Serra do Gerês-Xurés, NW Iberia. A critical review and a cosmogenic nuclide ( $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$ ) chronology. En: *Cadernos do laboratorio xeolóxico de Laxe*, 38; 25-44.

Vidal-Romaní, J.R. y Grandal d'Anglade, A. (2016) La construcción de Galicia desde sus raíces. El Macizo granítico del Monte Pindo (Coruña). *Geología* 2016. Instituto Universitario de Xeoloxía Isidro Parga Pondal. Universidade da Coruña.

Viveen, W.; Braucher, R.; Bourlès, D.; Schoorl, J.M.; Veldkamp, A.; Balen, R.T.; Wallinga, J.; Fernández-Mosquera, D.; Vidal-Romaní, J.R.; Sanjurjo-Sánchez, J. (2012) A 0.65 Ma chronology and incision rate

assessment of the NW Iberian Miño River terraces based on  $^{10}\text{Be}$  and luminescence dating. *Glob. Planet. Chang.* 94–95, 82–100.

Viveen, W. (2013) Multi-scale Tectonic Controls on Fluvial Terrace Formation in a Glacioeustatically-dominated River System: Inferences From the Lower Miño Terrace Record. Wageningen University, Wageningen (The Netherlands). Tesis doctoral. 222pp.

## Capítulo 2.

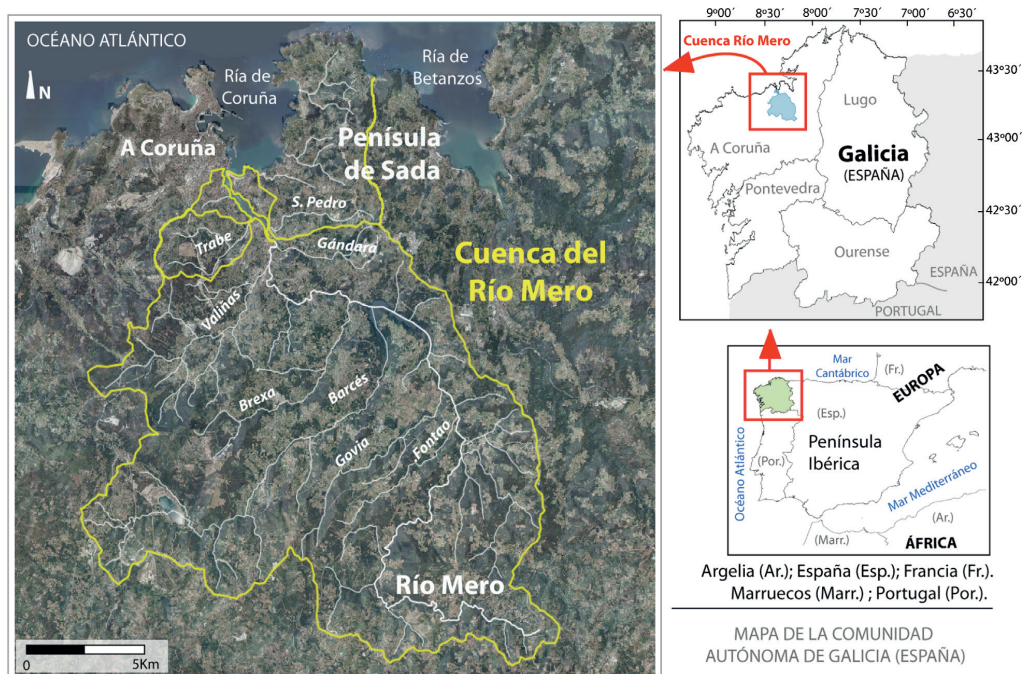
Descripción y antecedentes de los depósitos fluviales y la serie eólica datada.



### 2. Descripción y antecedentes para los depósitos fluviales y la serie eólica datada.

#### 2.1. Descripción geográfica de la cuenca del río Mero

El río Mero y sus afluentes conforman actualmente una pequeña cuenca de unos 345km<sup>2</sup> que drena parte de la comarca de As Mariñas (provincia de A Coruña; N.O. de la Península Ibérica) vertiendo sus aguas al Océano Atlántico y dando origen a la Ría do Burgo o Ría de A Coruña, en lo que viene denominándose geográficamente el golfo Ártabro (Fig. 2.1) (Río-Barja y Rodríguez-Lestegás, 1992; Escuer-Sole y Vidal-Romaní, 1986). Debido a la reducida dimensión de la cuenca es posible minimizar las fuentes de variabilidad que afectan la evolución de este sistema fluvial a lo largo del Cuaternario y que cuenta, además, con un número considerable de afloramientos sobre los que aplicar la técnica de datación absoluta OSL o IRSL.



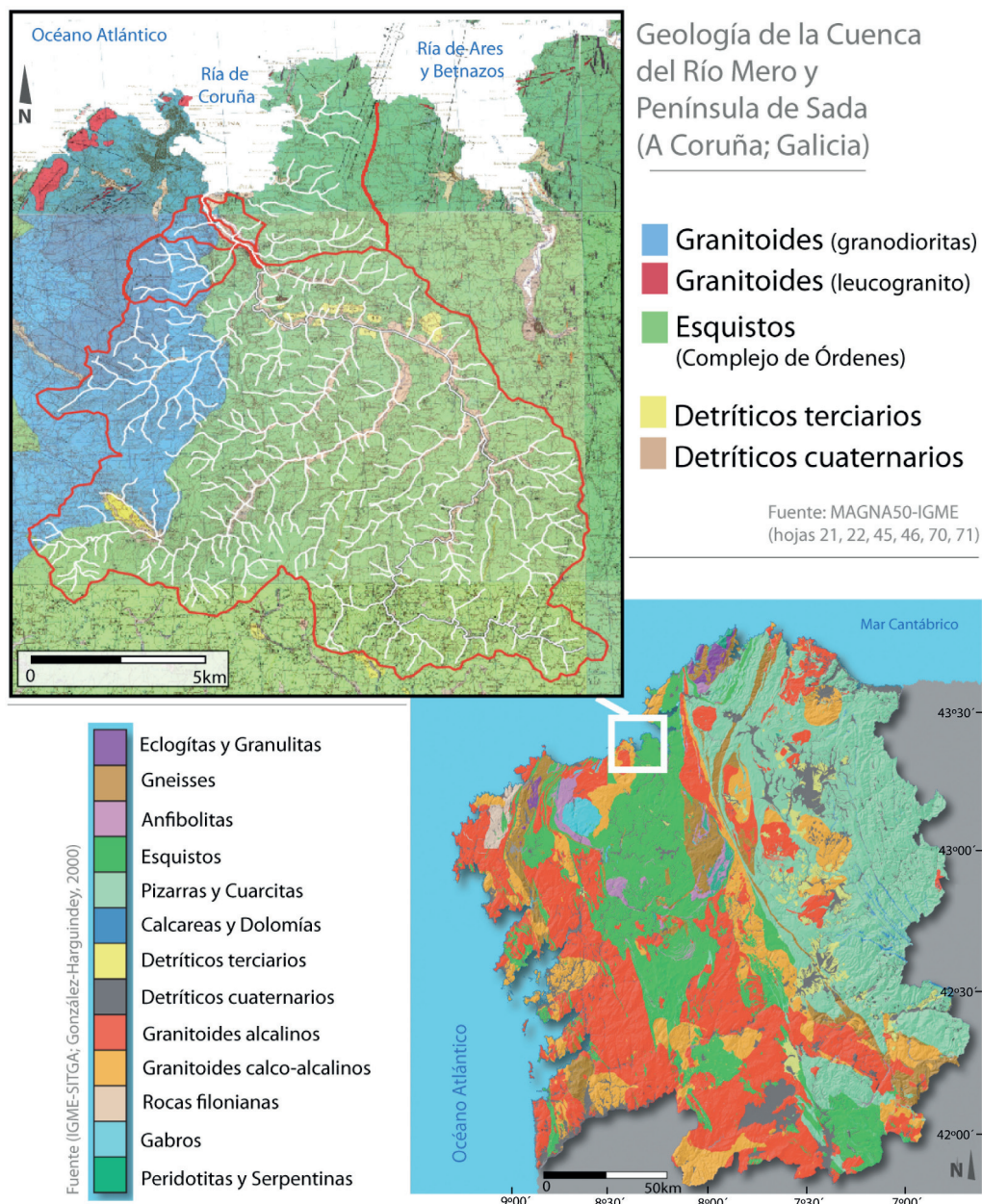
**Figura 2.1.** Mapa de situación de la cuenca del río Mero, representando su cauce principal y algunos de sus afluentes (ríos Fontao, Govia, Barcés, Brexa, Valiñas, Trabe, Gándara y San Pedro), e incluyendo algunos de los cauces que drenan en la vertiente oeste de la Península de Sada y desembocan en la Ría de Coruña (Galicia; NO Península Ibérica)

El canal principal del río Mero, desde su nacimiento en el Alto do Picoi a +546m snma, en los Montes de Tieira (Concello de Cesuras; A Coruña), discurre a lo largo de 46km con marcados cambios de dirección, condicionados mayoritariamente por aspectos tectónicos. El canal principal presenta una pendiente media del 1.08% aunque a lo largo de los dos primeros kilómetros, aproximadamente, y en algunos puntos de salto muy determinados (p.ej. en A Hermida, con un desnivel de 200 a 140m), la pendiente es de un 15%, si bien el resto del perfil no supera el 3%, reduciéndose al 1% y hasta el 0.2% en los últimos 10km (Río-Barja y Rodríguez-Lestegás, 1992), presentando un perfil cuasi-ideal (Schumm, 1977; Summerfield, 1991; Schum, 1993).

Una característica notable de esta cuenca es su disposición asimétrica, con un mayor desarrollo de los afluentes del margen izquierdo (ríos Govia, Barcés, Brexa y Valiñas) (Fig. 2.1), que se relaciona con aspectos tectónicos según los cuales, este canal principal, a medida que se configura la nueva disposición del relieve, capturaría las aguas de cauces paralelos pero independientes, haciendo de ellos sus actuales afluentes y diseñando la nueva red de drenaje (Escuer-Sole y Vidal Romaní, 1987).

Por otra parte, la cuenca del río Mero se desarrolla casi en su totalidad sobre una litología esquistosa y homogénea, perteneciente a la serie alóctona del Complejo de Órdenes (Fig.2.2) conformado por materiales precámbricos de fácil alteración, concretamente metasedimentos cuarzo-feldespáticos, como esquistos y filitas, sometidos a un metamorfismo de bajo grado (Engels et al., 1974). No obstante, una pequeña área al NO de la cuenca incluye un contacto con materiales graníticos hercínicos (granodiorita, granitos biotíticos y granitos de dos micas) del Macizo de A Coruña (Bastida, 1984) sobre la cual se desarrolla la sub-cuenca del río Valiñas y el río Trabe, o la cabecera del río Barcés, todos ellos afluentes del río Mero (Fig. 2.3 y 2.4). Sobre este zócalo se depositan sedimentos terciarios compuestos por arcillas, arenas, gravas y lignitos desarrollados sobre cuencas tectónicas mio-pliocenas (Gonzalez-Lodeiro et al., 1982), como la cubeta endorreica de Meirama, incluida en la propia cuenca y ligada a la falla homónima. A partir de los mismos materiales y sobre el mismo zócalo, descansan los depósitos continentales plio-cuaternarios y cuaternarios desarrollados por distintos sistemas de drenaje (Vidal-Romaní, 1978), entre los cuales se incluyen los sedimentos fluviales de la cuenca del Río Mero y Península de Sada.

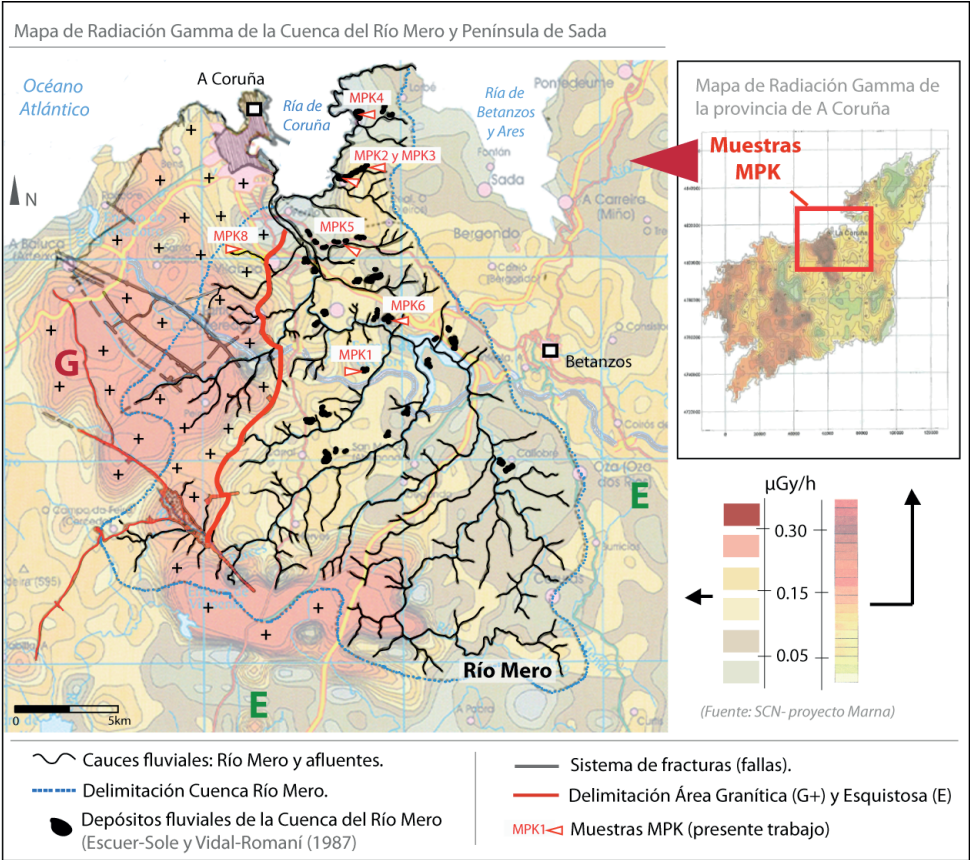




**Figura 2.2.** Mapa Litológico de Galicia (González-Lodeiro, 1982; González Harguindey, 2015) y mapas Geológicos de la cuenca del río Mero (Galán-Arias et al., 1981; Monteserín-López et al., 1975; Naval-Balbín et al., 1981; De Pablo-Maciá et al., 1981; Fernández-Pompa, 1975).



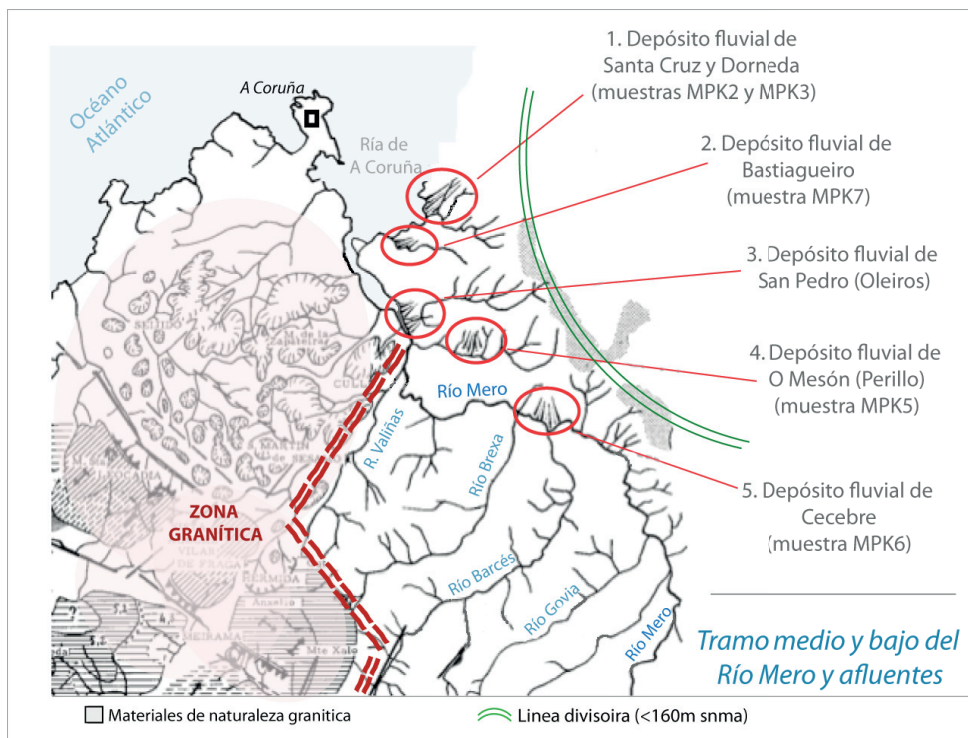
Un aspecto importante para la datación de estos sedimentos mediante luminiscencia OSL -y que, *a priori*, cuentan con una edad relativa Villafranquiense, una asociación faunística de Villafranca d’Astí (Italia) (Pareto, 1865) ubicada entre 3.5 y 1.2 millones de años (Chaline, 1982; McDougall, 1979; Berggren, 1987), muy por encima del límite superior de la técnica- es la relación existente entre los materiales de partida que dan origen a los depósitos y la tasa de radiación natural terrestre ya que, generalmente, el grado de ionización es menor en materiales esquistosos que en materiales graníticos debido a un menor contenido en isótopos radiactivos (Boyle, 1982; Gascoyne, 1992; CSN, 2000 -Proyecto MARNA), como se puede observar en la figura (Fig.2.3). Esta circunstancia permitiría, hipotéticamente, alcanzar rangos de edad más antiguos a condición de que los materiales empleados para la técnica, los granos de cuarzo y de feldespato, no hayan alcanzado un grado de saturación tal de la señal OSL o IRSL que imposibilite una datación fiable (ver apartado 4.1.).



**Figura 2.3.** Mapa de la cuenca del Río Mero y Península de Sada con los depósitos fluviales descritos por Escuer-Sole y Vidal-Romaní (1987) –de los que se han extraído las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón), MPK6 (Cecébre) y MPK8 (Vilaboa) datadas en el presente trabajo. También se delimita la zona granítica de la cuenca (G+) con su sistema de fracturas simplificado, todo ello superpuesto sobre el Mapa de Radiación Gamma de Galicia (CSN, 2000-Proyecto-Marna) con los valores de radiación gamma medido a 1m de la superficie.

## 2.2. Características de los depósitos fluviales desarrollados en la cuenca del río Mero: antecedentes.

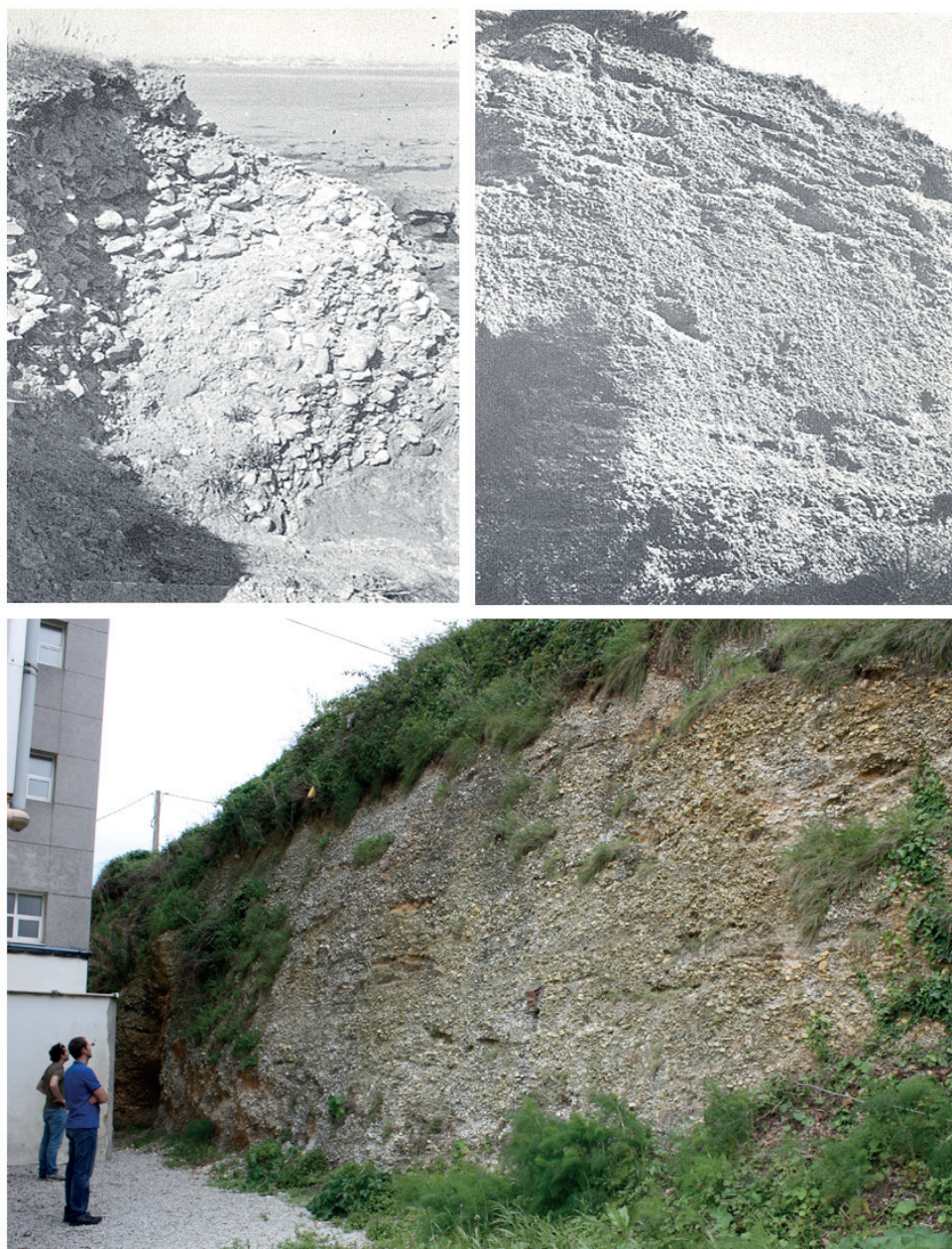
La descripción y cartografía de los sedimentos depositados en la cuenca del río Mero y en la vertiente oeste de la península de Sada, comprendiendo ésta última como la porción de terreno entre la Ría de A Coruña y la de Betanzos, se limita a los estudios realizados anteriormente por Nonn (1966) y posteriormente por Vidal-Romaní (1977; 1979) y Escuer-Sole y Vidal-Romaní (1987) (Fig. 2.4), si bien, algunos de ellos se mencionan en la hoja geológica de La Coruña (IGME, 1948).



**Figura 2.4.** Depósitos sedimentarios descritos por Nonn (1966) desarrollados sobre la cuenca del Río Mero y Península de Sada, algunos de los cuales se ha extraído una muestra para datación mediante OSL (figura modificada y extraída de Nonn, 1966).

Estos depósitos descritos presentan una potencia entre 3 y 15m, sin sobrepasar nunca los 20m (Fig. 2.5), desarrollándose con distinto grado de alteración sobre un material de base esquistoso que, en ocasiones, aparece altamente meteorizado.





**Figura 2.5.** Fotografías del depósito de Santa Cruz. Arriba: Imágenes del depósito de Santa Cruz realizadas por Nonn (1966) en distintas ubicaciones. Abajo: imagen actual de parte del depósito conservado y que coincidiría con la imagen superior derecha. En la imagen, aparecen el Dr. Sanjurjo-Sánchez (al fondo) y el Dr. Viveen observando el depósito en el año 2016.

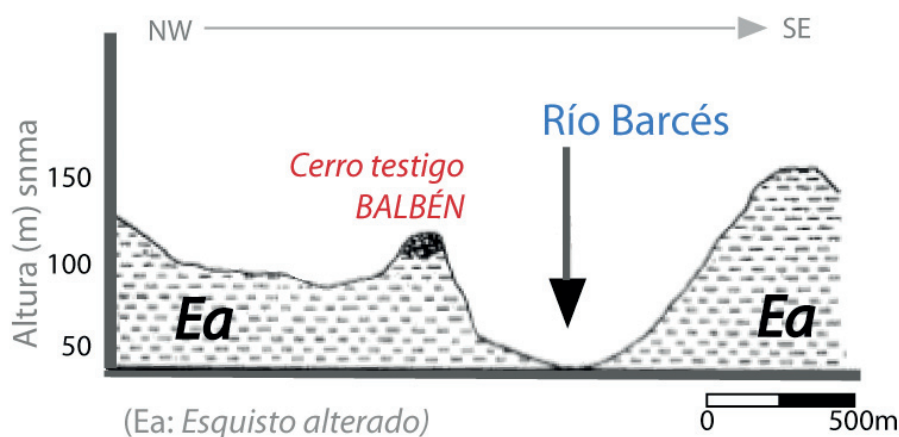
El análisis granulométrico de estos depósitos indica secuencias grano-decrecientes conformadas por gravas (80%), arenas, limos y arcilla (caolinita), si bien, surgen también cantos y en ocasiones bloques. La litología de estos materiales es mayoritariamente cuarcítica (99.9%) y muy homogénea, compuesta principalmente por cuarzo blanco procedente de filones y cuarzo azul gris, así como cuarcitas procedentes de los propios meta-sedimentos sobre los que se desarrollan (Vidal-Romani, 1977). Presentan, además, una mala clasificación y un grado de redondez entre anguloso-subanguloso a subredondeado, con marcas de impacto, aspectos que se asocian a un medio de alta energía, una carga transportada considerable y re-trabajado de los materiales.

En un extenso estudio geomorfológico sobre las regiones costeras de Galicia, Nonn (1966) hace referencia a estos depósitos, describiéndose como conos torrenciales caracterizados por acumulaciones de cantos cuarzosos y que, aunque aparecen diseminados por toda Galicia, aparecen principalmente en las rías de Vigo y A Coruña en un periodo en el que el Cuaternario en Galicia comienza con una modificación drástica en el sistema de erosión. Así, y en base a los criterios relativos, en ocasiones poco consistentes, como pudiera ser la vegetación fósil observada en las fosas tectónicas, escasamente estudiada, o las condiciones ambientales requeridas para la formación de la caolinita observada en la zona – materiales cuya génesis se relacionaba únicamente a partir de la alteración del material de partida en un ambiente templado-húmedo y un clima tropical o subtropical, que entran en contradicción con los neoformados en climas fríos, como ocurre en Finlandia, y en donde se asocia la formación de estos minerales con el régimen de precipitación y la permeabilidad del material de partida, más que con la temperatura (Gilg et al., 2013)- se propone una transición que parte de un clima pluvial-húmedo, caracterizado por una vegetación muy desarrollada y gran alteración del material de partida, hacia un periodo semi-árido de tipo mediterráneo, con menor cubierta vegetal y una gran erosión ocasionada por fuertes lluvias periódicas. Este incremento de las precipitaciones originaría la formación de estos depósitos torrenciales caracterizados como “una asociación de fragmentos cuarzosos de tamaño medio, arcilla fina o arenosa siempre blanca, en donde el cuarzo es la única litología representada, pudiendo aparecer cuarcita o violita profundamente caolinizada cuya alteración tiene lugar en el Mioceno” (*op.cit.* pág. 476). Es por ello por lo que, además, adquieren la denominación de facies atlántica de raña debido a la similitud con la facies de raña de la meseta castellana- si bien, y aún aceptando la ambigüedad del término “raña”, ésta última presentaría un tamaño de clastos muy superior (Nonn, 1966; De Groot, 1974).

Nonn (1966) diferencia la acumulación de estos depósitos en la cuenca del río Mero en dos categorías relacionadas con sus situación geográfica: los depósitos que tapizan la vertiente norte del valle, poco característicos y remodelados como terrazas por el propio río, y aquellos que aparecen en los flancos de los valles directamente tributarios de la ría de A Coruña, que son más notables y están menos modificados. No obstante, cronológicamente, ambas equivaldrían a un mismo episodio de formación descrito como una fase morfogenética semiárida que habría tenido lugar durante el Terciario final o Cuaternario inicial, posterior a la

fase de alteración pliocena mencionada. Además, propone que, dado que los conos torrenciales de la cuenca alimentarían las terrazas fluviales a +60 y +45m sobre el cauce actual y que la base de estos depósitos azonales se encuentra por debajo del nivel del mar actual, ha de haber una relación con algún periodo regresivo más allá de las etapas posglaciares en centro Europa denominadas *Mindel-Riss* (>400ka) e incluso el *Günz-Mindell* (>800ka), situándolos en el Villafrankiense o *Günz* (>1Ma) (Nonn, 1966), denominaciones y correlaciones que resultan, a día de hoy, cronológicamente, ambiguas.

En un estudio posterior realizado por Vidal-Romaní (1977) se describen una nueva serie de niveles de terrazas (+60, +45, +30, +20 y +8m snma) y se reclasifican los depósitos en base a criterios morfológicos, teniendo en cuenta, además, la ausencia casi generalizada de grandes relieves asociados a la formación de los conos torrenciales citados por Noon (1966), dándose casos, como en la Península de Sada, en donde los afloramientos se sitúan próximos a la divisoria. Así, se describen dos tipos de formaciones: abanicos aluviales y terrazas fluviales. Los primeros son de poco espesor, marcada heterometría y en donde apenas se desarrollan estructuras sedimentarias, entre otros aspectos. Las terrazas fluviales son de mayor potencia (entre 13 y 15m), con estructuras mucho más desarrolladas y siempre limitadas por una superficie plana sin conexión con las paredes del valle, e incluso constituyendo un cerro testigo a modo de relieve invertido (Fig. 2.6).

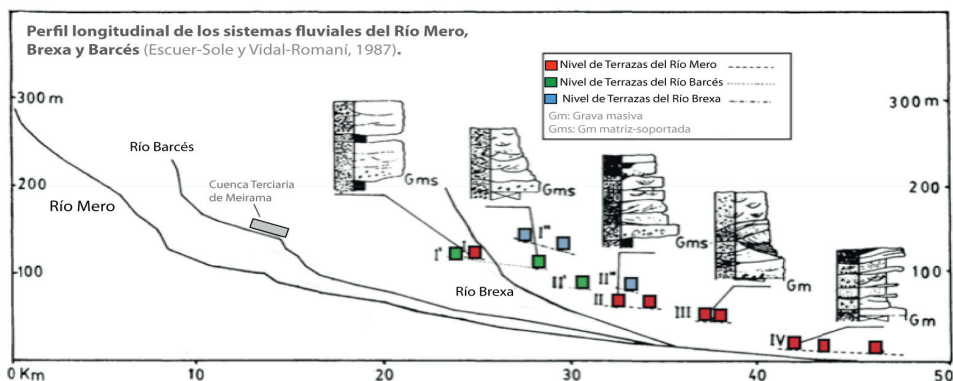


**Figura 2.6.** Ilustración del cerro testigo en la localidad de Balbén (A Coruña; NO de la Península Ibérica), modelado por el río Barcés (figura modificada, extraída de Vidal-Romaní, 1977), en donde se observa como algunos de estos depósitos fluviales, antes pertenecientes al lecho del río, pasan a permanecer a mayor altura al proteger de la erosión al sustrato esquistoso (alterado) subyacente, a diferencia de lo que ocurre con el resto de la roca madre.

En el estudio mencionado no se constata evidencia alguna de terrazas de carácter subsidiario alimentadas por conos torrenciales, como propone Noon (1966), correspondiéndose únicamente su génesis con la actividad de la red fluvial con la que se asocian. Los abanicos corresponderían a los depósitos relacionados con cursos de segundo orden como los de Mera, Santa Cruz, arroyo de la Gándara y río de San Pedro, y las terrazas corresponderían a depósitos que bordean los cursos actuales de los ríos Mero, Barcés, Brexa y Govia, si bien, el río Valiñas no desarrolla depósitos de gravas cuarzosas debido a que su sub-cuenca se desarrolla sobre una litología granítica, y en donde la alteración del material de partida, más homogénea, no da lugar a restos de materiales sin atacar como ocurre con los filones de cuarzo inyectado o con intercalaciones de cuarcita en la zona de esquistos de la propia cuenca del Río Mero.

En la explicación que se propone, y a falta de indicios estructurales o tectónicos, los depósitos son considerados como residuos de los diferentes perfiles de equilibrio alcanzados —y no culminados en un perfil cuasi ideal— durante las oscilaciones eustáticas del Cuaternario, a modo de escalonamientos o terrazas cuya prolongación se correspondería con el propio fondo del valle para cada variación del nivel del mar (Fig. 2.7). Desde esta perspectiva, se abandona la idea de un único momento de formación ya que la contemporaneidad entre una terraza cuyo nivel eustático está a +60m sobre el nivel del mar actual con un cono torrencial desembocando a -2m por debajo del nivel del mar actual pierde consistencia debido a la destrucción que supondría cualquiera de los sucesivos episodios de transgresión marina a lo largo de los ciclos interglaciares del Cuaternario sobre los depósitos situados a menor altitud, como por ejemplo los situados a nivel del mar en Mera y Santa Cruz. Por tanto, si se comparan los distintos niveles de terrazas de esta cuenca con sus equivalentes en otros sistemas fluviales, como por ejemplo aquellos estudiados en el curso inferior del Río Miño (Butzer, 1967), este nivel +60m mencionado sí podría situarse, en base a criterios geomorfológicos, en el Pleistoceno inicial coincidiendo con la edad fini-terciaria mencionada por Nonn (1966), aunque los niveles inferiores se originarían en distintas épocas, siendo sucesivamente más modernos.





**Figura 2.7.** Perfil longitudinal de los ríos Mero, Barcés y Brexa con algunos de sus niveles de terraza descritos, y equivalentes a los definidos en la mayoría de los ríos gallegos de gran recorrido como el sistema Miño-Sil o el río Tambre (Vidal-Romaní, 1978).

La similitud entre el grado de redondez de los materiales que conforman las terrazas más antiguas respecto a los depósitos más modernos, en donde se observa mezcla de materiales redondeados y sub-angulosos, quedaría explicada por un reciclaje o re-trabajado de los materiales más antiguos a lo que se suman nuevos aportes a medida que se genera un depósito más reciente (Vidal-Romaní et al. 1977). Por último, también se hace referencia a una hipotética alternancia de episodios pluviales-húmedos, caracterizados por una densa vegetación e intensa alteración edafogenética y/o del material de partida (esquistos) seguidos de episodios inter-pluviales semi-áridos caracterizados por una reducción de la cubierta vegetal y un incremento de la erosión del sustrato, formándose así los depósitos.

Otro estudio más exhaustivo de estos depósitos llevado a cabo por Escuer-Sole y Vidal-Romaní (1987) aporta un mayor detalle de las facies y morfogénesis de los niveles (ya definidos en Vidal Romaní et al., 1977 y Vidal-Romaní, 1978) describiendo un transporte de materiales en un medio acuoso (*fludial debris flow*) con una densa carga de fondo que circularía sobre el lecho tapizando el sustrato, diferenciándose así dos tipos de ambientes fluviales: cinturones de canales móviles de tipo trenzado, por una parte, y cursos torrenciales por otra, cada uno con un modelo de disección característico y alternándose periodos de acumulación y encajamiento. La acumulación se produciría en momentos en los que los aportes laterales sobrepasarían la capacidad de evacuación de los ejes de drenaje, para producirse posteriormente el encajamiento de los ejes de drenaje respecto a los interfluvios, formándose el sistema de terrazas. Así, sucediéndose ambos procesos de forma repetida en el tiempo, se ubicaría la cronología de la formación de los depósitos en distintas etapas a lo largo del Cuaternario debido, principalmente a causas climáticas, si bien, no se descartaba la implicación de procesos eustáticos o tectónicos.

Respecto a la ubicación física de los depósitos establecida por Escuer-Sole y Vidal-Romaní, (1987) –y referencia a seguir en el presente trabajo– se describen para el río Mero siete depósitos correspondientes a cuatro

niveles de terrazas con cotas relativas de +60, +45, +35 y +25m, y tres para el río Brexa y el Barcés con cotas de +60 y +45m (Fig. 2.7). Para la Península de Sada se describen dos depósitos (Mera y Santa Cruz) y dos más para dos corrientes de segundo orden, Seijal-O Carballo (+20m) y A Raposeira. Estas cotas hacen referencia a metros sobre el nivel del mar actual.

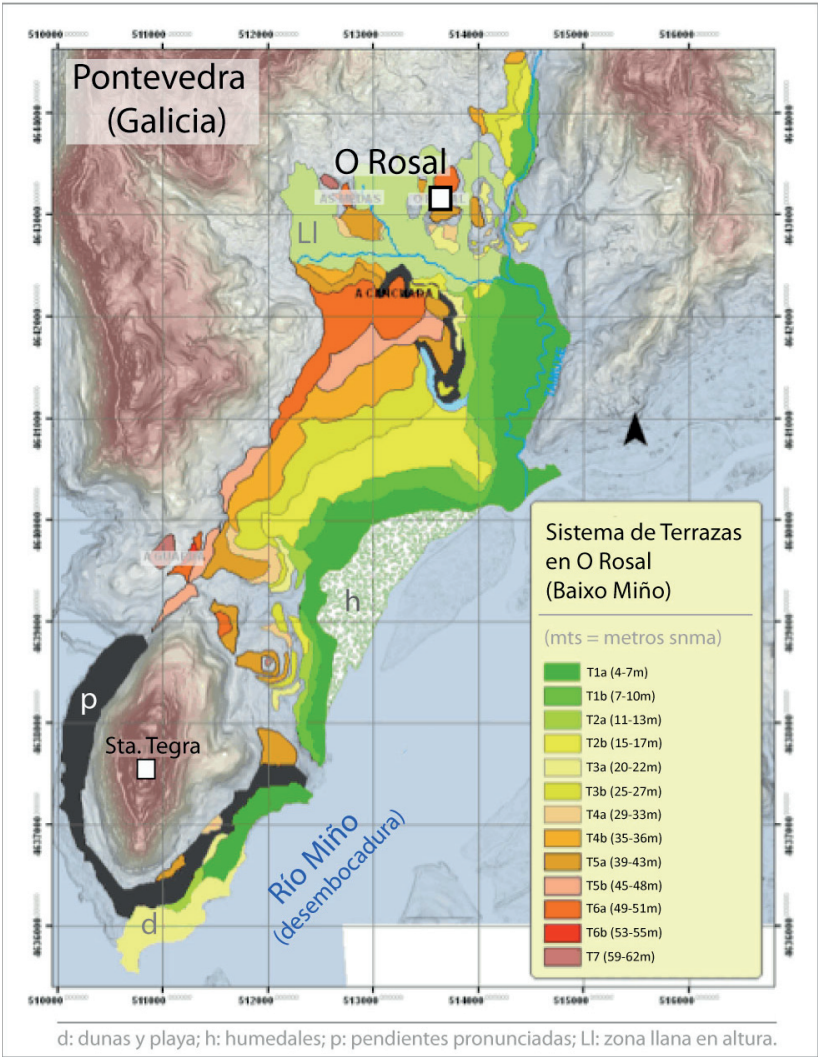
Cronológicamente, todo parece indicar que las fases de alteración del sustrato son anteriores al aterrazamiento y que los depósitos se desarrollarían a lo largo del Cuaternario, pudiéndose relacionar con niveles eustáticos y episodios glacio-interglaciales. Se ha hecho referencia al perfil longitudinal cuasi-ideal, con pequeños saltos (*nick-points*) y que, a falta de indicios tectónicos, litológicos o estructurales que los justifiquen, se vienen asociando con el propio proceso de encajamiento de la red fluvial interpretándose como restos de los diferentes perfiles de equilibrio no consolidados formados durante las oscilaciones eustáticas cuaternarias (Vidal Romaní, 1979) correspondiéndose, así, con las distintas secuencias de terrazas fluviales.

En los últimos años se han realizado dos extensos trabajos de campo en las terrazas fluviales del curso bajo del Río Miño (Pontevedra; Sistema Miño-Sil; NO de la Península Ibérica), en su vertiente gallega y portuguesa. En el primero, realizado por Lommertzen (2011), se amplía la resolución de los niveles de terrazas fluviales citados en trabajos anteriores (Teixeira, 1957; Butzer, 1967; Cano Pan, 1997), describiendo una serie de intervalos más cortos entre +4 y +60m (snma). Nueve de estos niveles se corresponden con los niveles marinos encontrados y estudiados en la zona, a lo largo de la costa, asociándose todo ello a una tasa de levantamiento del terreno entre 0.5 y 0.7mm/a que daría origen al encajamiento del cauce y la formación de este sistema de terrazas tan continuado, así como la elevación de la costa y exposición de los depósitos marinos por encima de su nivel de base correspondiente (Fig. 2.8). Así, a la explicación lógica según la cual los fenómenos glacio-eustáticos y climáticos explican y relacionan el encajamiento de los ríos con el retroceso en el nivel de base al acumularse agua oceánica en forma de hielo durante las épocas glaciares, o la formación de niveles marinos en la costa debido al ascenso del nivel de base durante las transgresiones marinas al deshacerse los hielos durante las etapas interglaciares, se sumarían los aspectos tectónicos y su repercusión sobre el conjunto de depósitos, teniendo en cuenta las variaciones en la elevación del terreno para cada zona.

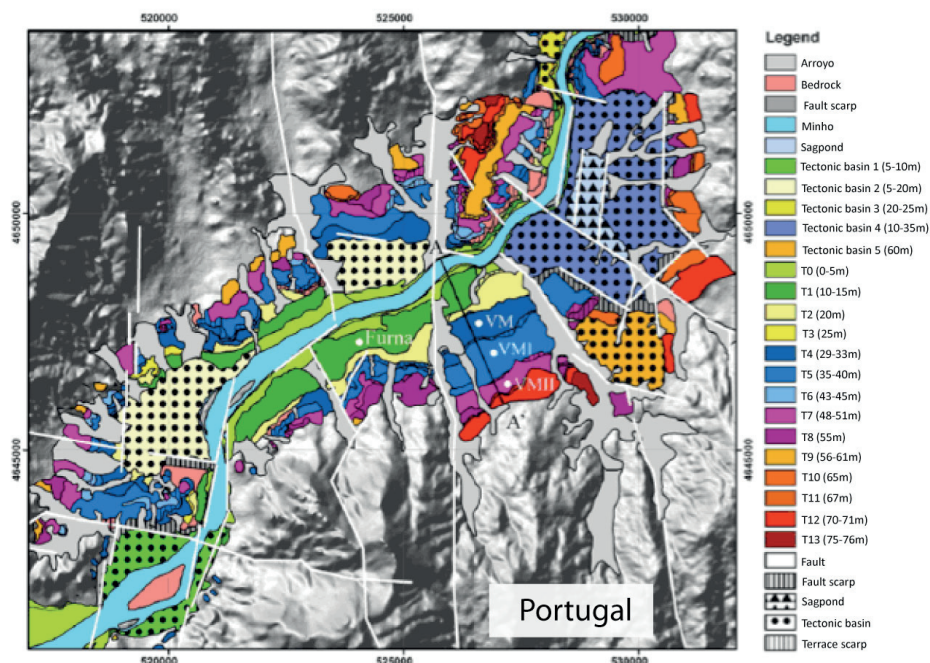
Posteriormente, Viveen (2012; 2013; 2014), en el exhaustivo trabajo de campo que realiza y que da lugar a su tesis doctoral, diseña un mapa regional en detalle de hasta 11, 14 e incluso 16 niveles de terraza para cada una de las zonas estudiadas (Fig. 2.9), y desarrolla, entre otros aspectos, un modelo numérico que determina la influencia de los fenómenos glacio-eustáticos, climáticos y tectónicos a lo largo del perfil longitudinal en el río Miño. Además, para determinar la tasa de levantamiento se aplican métodos de datación absoluta basados en núclidos cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ ) y luminiscencia OSL e IRSL, obteniendo valores para la vertiente gallega del Bajo Miño de 0.8mm/a durante los último 600ka. Si bien, para los elementos datados mediante  $^{10}\text{Be}$  se alcanzan edades de más de medio millón de años para los niveles superiores, como, por ejemplo, unos 650ka para el



nivel +60m (snma), las dataciones mediante luminiscencia OSL e IRSL permiten únicamente obtener un rango de edad mínima aproximado entre 40 y 130ka para los niveles situados entre +9 y +15m (snma) (Viveen, 2014).



**Figura 2.8.** Sistema de terrazas (T) en el Baixo Miño (sistema fluvial Miño-Sil) en el valle de O Rosal (Pontevedra, Galicia). Imagen modificada y extraída de Lommertzén (2011).



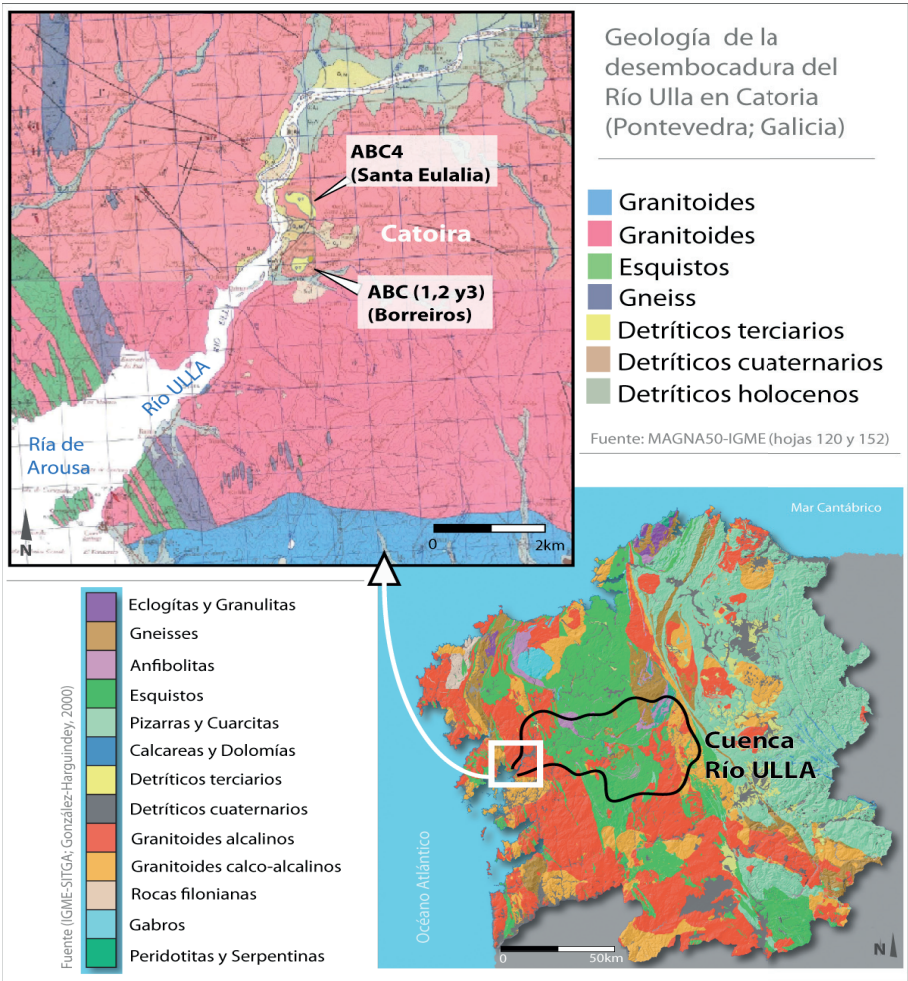
**Figura 2.9.** Mapa del sistema de terrazas (T) desarrollado en el Baixo Miño (sistema fluvial Miño-Sil) (Viveen, 2012).

### 2.3. Descripción geológica de los depósitos fluviales del río Ulla en de Catoira.

En la actualidad, el Río Ulla y sus afluentes conforman una cuenca de unos 2800Km<sup>2</sup> -la segunda en extensión en la Comunidad Autónoma de Galicia, después del sistema fluvial Miño-Sil- a lo largo de 131Km (Río-Barja y Rodríguez-Lestegás, 1997) y dando origen a la Ría de Arousa. Esta área de drenaje incluye litologías muy variadas (Fig. 2.10), como son aquellas incluidas en el Complejo de Órdenes, en su curso medio y alto, como esquistos, gneises, anfibolitas, gabros, rocas ultramáficas (peridotitas y serpentinas), o granitoides, también incluidos en su curso bajo pero pertenecientes a la Unidad Malpica-Tui.

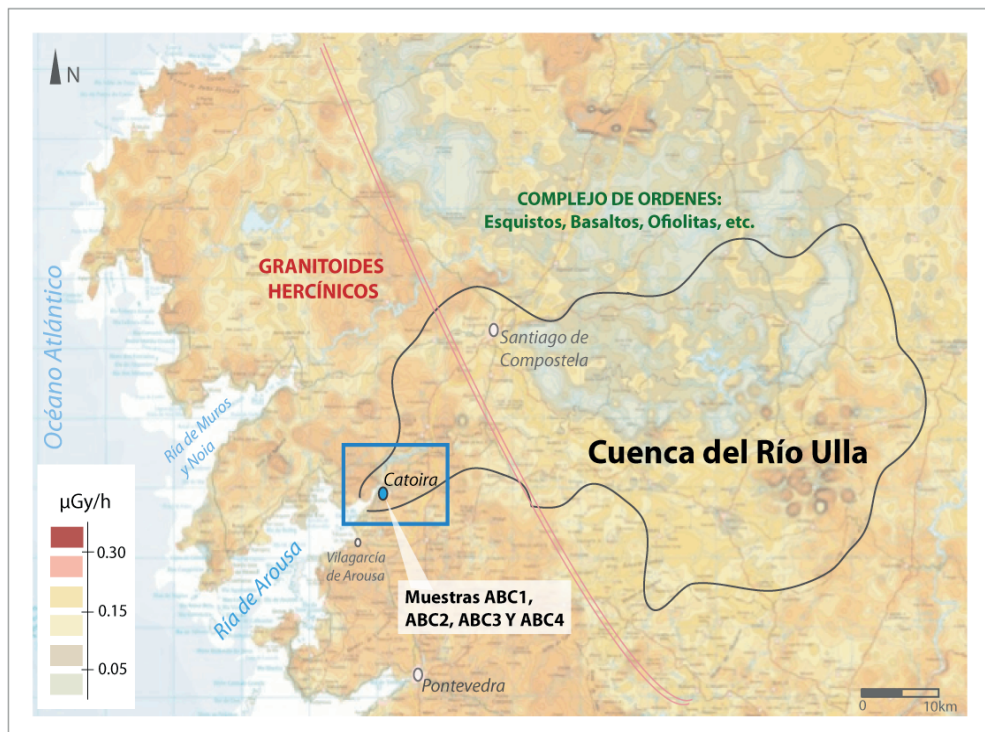
No obstante, estos depósitos desarrollados a la altura de la localidad de Catoira (Pontevedra; Galicia; España) en donde predominan los granitos *sensu lato*, están conformados por materiales de diversas litologías, como se ha comentado, por lo que a efectos de radiactividad los valores especificados en superficie para radiación gamma a partir del estudio Marna (2000) (Fig. 2.11) pueden no ajustarse a los valores estimados mediante espectrometría gamma de alta resolución, imprescindibles para la aplicación de la técnica de datación OSL y pIR-IRSL, como se comentará posteriormente.

A modo de antecedentes, los depósitos fluviales del río Ulla de los que se extrajeron las muestras de Borreiros (ABC1, ABC2, ABC3) y Santa Eulalia (ABC4) fueron descritos como depósitos aluviales por Nonn (1966), junto con aquellos que afloraban en las zonas de Padrón, en la Ría de Arousa y en las inmediaciones del monte Xiabre, entre los municipios de Catoira, Caldas de Reis y Vilagarcía de Arousa (Pontevedra; Galicia; España), y que también se citan también en la hoja 120 del Mapa Geológico de España 1:50.000 (IGME, 1981) como depósitos cuaternarios aluviales indiferenciados, de edad holocena y en la hoja 152 (IGME, 1978) como granito arenizado o xiabre.



**Figura 2.10.** Mapa simplificado de la litología de Galicia (González-Lodeiro, 1982; González Harguindey, 2015) y litología de la desembocadura del río Ulla en Catoira a partir del mapa geológico 1:50.000 de las hojas 120 y 152 del IGME (Fernández-Rodríguez Arango et al., 1981; Hernández-Urroz et al.; 1982), en donde se desarrollan los depósitos correspondientes a las muestras ABC.





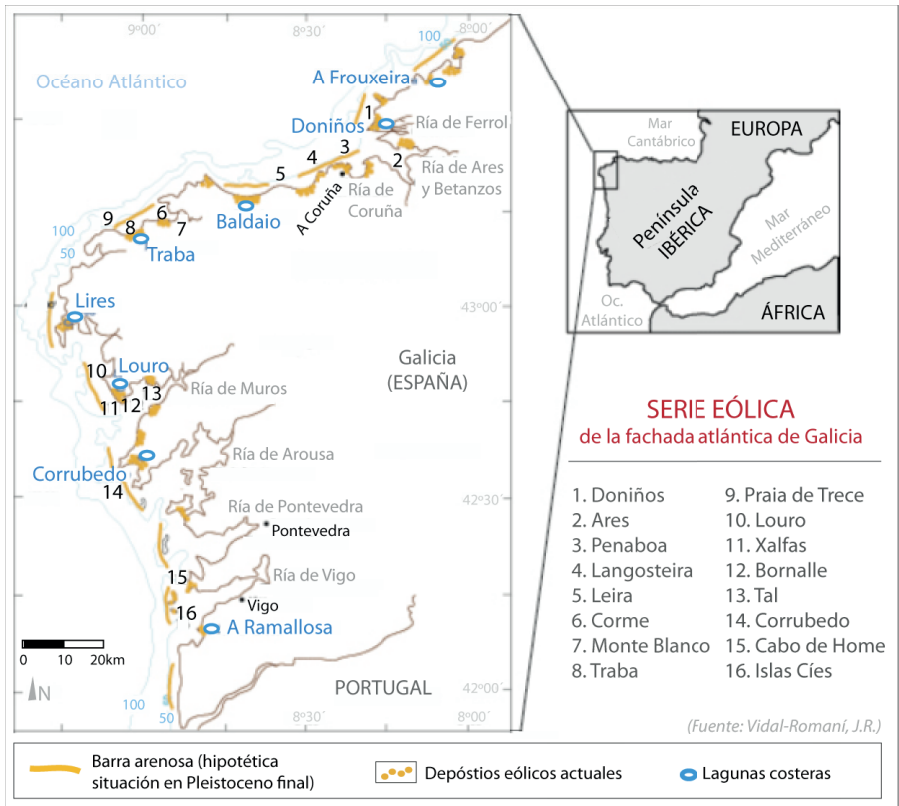
**Figura 2.11.** Mapa Radiación Gamma de Galicia (Marna, 2000) representado parcialmente e indicando el área que ocupa la cuenca del Río Ulla indicando los valores aproximados de radiación gamma en superficie (a 1m del suelo). También se indican las litologías predominantes, como los granitoides hercínicos o los esquistos del complejo de Ordenes sobre los que atraviesa la red de drenaje. En el recuadro azul se indica la localidad de Catoira en la cual se extrajeron las muestras ABC1, ABC2, ABC3 y ABC4.

#### 2.4. Serie Eólica: Introducción y antecedentes.

La serie eólica que se desarrolla a lo largo del litoral gallego (NO de la Península Ibérica) (Fig.2.12) tiene un enorme interés -junto con los depósitos marinos y fluviales colgados en superficie a distintas alturas (entre +60 y +20)- en cuanto a indicios de las variaciones en el nivel del mar durante Cuaternario (Vidal-Romaní, 1996). No obstante, aunque el estudio de los edificios eólicos en el NO de la Península Ibérica se ha ido desarrollando en los últimos años (Granja y Carvalho, 1992; Flor, 1992; López-Cancelo, 2004; Gutiérrez-Bequer, 2008), su datación mediante técnicas absolutas es muy escasa y en ocasiones poco fiable.

El origen de estos sedimentos arenosos ha sido considerado frecuentemente como marino, cuyos niveles han sido retrabajados posteriormente por el viento y asociándose a la última transgresión holocena (Devoy, 1996). También han sido considerados como depósitos marinos asociados a etapas cálidas interglaciares con un nivel

del mar alto a lo largo del cuaternario (Alonso y Pagés 2000). No obstante, estos depósitos, caracterizados a día de hoy como exclusivamente eólicos (Vidal-Romaní, 2000), se consideran vestigios de las formaciones eólicas que alternativamente han sido formadas y destruidas durante las oscilaciones glacio-esutáticas del Cuaternario, idea que, a modo de antecedente, ya se barajaba en los estudios previos realizados en algunos de los afloramientos costeros próximos a la ciudad de A Coruña y Ferrol (Galicia, NO Península Ibérica) (Vidal-Romaní, 1974; Nieto y Vidal-Romaní, 1989), representados en la figura (Fig. 2.13) y que ampliaban los estudios previos realizadas por Nonn (1966) y Caraballo Muziotti (1969) en la zona.



**Figura 2.12.** Localización de algunos de los depósitos pertenecientes a la serie eólica desarrollada en la fachada atlántica gallega (NO Península Ibérica), incluyendo lagunas costeras, depósitos eólicos actuales y la situación hipotética de las barras arenosas durante el Pleistoceno final según Vidal-Romaní (2015). Mapa modificado, cortesía de D. Juan Ramón Vidal Romaní.



**Figura 2.13.** (Arriba) Fotografía de uno de los afloramientos costeros en Punta Langosteira, próximo a la ciudad de A Coruña. (Abajo) Detalle de algunos de los cuerpos arenosos pertenecientes a los depósitos eólicos encontrados en estos afloramientos. Fotografías extraídas del trabajo inédito de Vidal-Romaní (1974).

El desarrollo de los edificios eólicos a lo largo de la costa noroccidental ibérica varía en función de su morfología. Así, para el litoral gallego -litoral descrito como un tipo de costa de rías formadas por la inundación de valles fluviales durante las transgresiones marinas durante el Cenozoico (Vidal-Romaní, 2002; Vidal-Romaní, 2015) y caracterizado por un perfil irregular, un relieve de acantilados intra-placa de altitud variable (entre 0 y 900m) y un medio de alta energía- se definen dos tipos de depósitos eólico-costeros en función de su facies

(Gutiérrez-Becker, 2008) presentando, por una parte, depósitos de tipo dunas actuales o sub-actuales, de pequeñas dimensiones, aisladas de su área fuente (debido a la transgresión marina), estabilizadas ahora por la vegetación y que se relacionan con la última transgresión marina acontecida durante los últimos 5ka (Devoy, 1996; López Cancelo, 2004). Este tipo de depósitos pueden reactivarse en episodios de tormenta siendo desmantelados por el mar para formar la playa actual y migrar posteriormente por acción del viento hacia el interior, siendo así re-estabilizados de nuevo (por la vegetación) —e inexorablemente destruidos en la actual oscilación eustática (glacio-esutática) positiva a medida que el nivel del mar asciende.

Por otra parte se definen afloramientos puntuales, desconectados, de poca entidad y cuya potencia suele ser inferior a los 5m, correspondientes a depósitos tipo eólico fósil que aparecen como cuñas arenosas bien consolidadas y que en ocasiones fosilizan niveles marinos a distinta altura o depósitos de vertiente. Estos depósitos están asociados a vestigios de antiguas dunas rampantes (*climbing dunes*) cuyo avance se ve obstaculizado, generalmente, por un relieve escarpado (de naturaleza mayoritariamente granítica) y cubriendo a su paso, en función de su capacidad, todo tipo de materiales, incluyendo los paleo-bosques desarrollados en aquellas áreas abandonadas durante las regresiones marinas precedentes, así como lagunas de tipo continental, etc. (Vidal-Romaní, 1996; Vidal-Romaní et al., 2017).

Los depósitos analizados en el presente trabajo pertenecen a este segundo tipo de depósitos cuyas condiciones de formación, en base a criterios geomorfológicos (Nieto and Vidal-Romaní, 1989;; Gutiérrez-Béquer, 2008), se asocian a etapas regresivas y erosión eólica de amplias áreas expuestas como viene ocurriendo de manera persistente, al menos durante los últimos 80ka (Roucoux et al., 2006). Sin embargo, y aunque los depósitos de dunas se han relacionado frecuentemente con regresiones holocenas (<11ka) caracterizadas por un régimen de temperaturas más bajas que en la actualidad (Santos et al., 1993; Mosquera-Santé, 2000; Vidal-Romaní et al., 2000; Blanco-Chao, 2003; López-Cancelo, 2004), no se disponen de suficientes datos basados en fundamentos científicos, como fósiles o dataciones absolutas, que apoyen los datos sedimentológicos.

Se han realizado numerosas dataciones mediante radiocarbono en la región noroccidental de la Península Ibérica, puntuales e inconexas, asociadas a niveles marinos o de depósitos de distinta naturaleza que pudieran relacionarse, a su vez, con variaciones en el nivel del mar (Nonn, 1966; Butzer, 1967; Brosche, 1982; Vilas Martín et al., 1986; Santos, 1993; Costa-Casais, 1996; Vidal-Romaní, 1997; Cano et al., 1997; Granja e Carvalho, 1995; Carvalho e Granja, 1997; Mosquera-Santé, 2000; Gutiérrez-Becker, 2008; etc.) y que otros autores han recopilado para, a modo de correlación, construir un esquema de algunas de estas oscilaciones eustáticas (del Cuaternario) ((Alonso y Pagés, 2000; Blanco Chao, 2003) si bien, es importante tener en cuenta que el límite de esta técnica es de 40 - 50ka y que las correlaciones regionales o globales se ven afectadas en gran medida por aspectos locales de otra índole (tectónica, etc.).

Respecto empleo de técnicas de datación absoluta mediante las cuales se pueda obtener un rango de edad superior, hasta 500ka o más, para este tipo de depósitos o relacionados con ellos, se han realizado dataciones mediante luminiscencia OSL, también puntuales, en la costa portuguesa (Carrilho, 2003; Soares de Carvalho, 2006). En la costa gallega se han datado algunos depósitos considerados erróneamente como marinos mediante la técnica de termoluminiscencia (TL) a partir de grano fino (2-11 $\mu$ m) poli-mineral, sin adjuntar mayor información analítica que las edades finales, entre 60 y 70ka, por lo que no se consideran fiables dichas dataciones, así como las realizadas en el mismo trabajo mediante la técnica de uranio-torio, que los propios autores desestiman o las realizadas mediante  $^{14}\text{C}$ , ya en el límite de edad de la técnica (Alonso y Pagés, 2007). También se desestiman por su falta de fiabilidad, las dataciones realizadas mediante luminiscencia OSL de los depósitos eólicos datados en el trabajo de Gutiérrez-Becker (2008), considerando como única referencia fiable la datación obtenida mediante luminiscencia OSL del depósito eólico de Penaboa (A Coruña; Galicia; NO de la Península Ibérica) con una edad aproximada de unos 300ka (Trinidade et al., 2013). Queda reflejado, por tanto, la ausencia de dataciones absolutas para este tipo de depósitos con la finalidad de determinar algunos de los distintos episodios regresivos del Pleistoceno final, siendo este el principal objetivo del presente trabajo.



## 2.5. Bibliografía

- Alonso, A.; Pagés, J.L. (2000) El registro sedimentario del final del Cuaternario en el NW de la Península Ibérica. Márgenes Cantábrico y Atlántico. *Revista de la sociedad geológica de España* 13, 17-29.
- Alonso, A.; Pagés, J.L. (2007) Stratigraphy of Late Pleistocene coastal deposits in Northern Spain. *Estratigrafía de los depósitos costeros pleistocenos en el noroeste de España. Journal of Iberian Geology* 33, 207-220.
- Berggren, W.A. (1987) Neogene chronology and chronostratigraphy new data. *Ann. Inst. Geol. Publ. Hungar* 70, 9-41.
- Blanco-Chao, R.; Costa-Casais, M.; Martínez-Cortizas, A.; Héchez-Alberti, A.; Tranhale, A. (2003) Evolution and inheritance of a rock coast: Western Galicia, Northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 757-775.
- Boyle, R.W. (1982) *Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits*. Elsevier, New York, 489pp.
- Brosche, K.U. (1982) Die geomorphologisch-bodengeographische Deutung der pleistozänen Sedimente und der forssilen Böden an der Playa de Baranan (west La Coruna) und bei Cangas de Foz (Nord-Galizien). *Eiszeitalter und gegenward* 33, 95-117.
- Butzer, K. (1967) Geomorphology and stratigraphy of the paleolithic site of Budiño (Pontevedra, Spain). *Eiszeitalter und gegenward* 18, 82-103.
- Cano-Pan, J.; Aguirre-Enríquez, E.; Giles-Pacheco, F.; García-Prieto, J.; Santiago-Pérez, A.; Mata-Almonte, E.; Gutiérrez-López, J.M.; Díaz- del Olmo, F.; Baena-Escudero, R.; Borja, F. (1997) Evolución del Pleistoceno en la cuenca baja del Miño, sector La Guardia-Tuy. *Secuencia de los primeros poblamientos humanos y registro arqueológico. Actas Cuaternario Ibérico, Huelva, España*, 201-212.
- Caraballo Muziotti, L.F. (1969) Estudio fisiográfico-sedimentológico de las rías y frente costero comprendidos entre la Estaca de Vares y el Cabo Prior (Provincia de La Coruña). *Universidad Complutense. Facultad de Ciencias. Sección de Geológicas. Serie A* 93, 1-207.
- Carrilho, I.M. (2003) *Deformação geotectónica pós-pleistocénica na zona costeira entre os rios Minho e Ave*. Departamento de Ciencias da Terra, Universidade do Minho, Braga, Portugal. Tesis doctoral.
- Carvalho, G.S.; Granja, H. (1997) Terraços versus Litostratigrafia e geocronologia do Pleistocénico e do Holocénico da zona costeira do Minho (Portugal). *APEQ. Estudos do Quaternário* 1, 25-40.
- Chaline, J. (1982) *El Cuaternario. La historia humana y su entorno*. Akal editor, 312 pp.
- Costa-Casais, M.; Martínez-Cortizas, A.; Pérez-Alberti, A. (1996) Tipo de depósitos costeiros antigos entre o Cabo de Fisterra e o Cabo de Corrubedo. En: *Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios*. In: Pérez Alberti, A, Martini, P., Chesworth, W, Martínez Cortizas, A. (eds.). Xunta de Galicia. 417-430.
- CSN (2000) *Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural*. Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid.
- De Pablo-Maciá, J.G.; Martínez-Catalán, J.R. (1981) Hoja 70: Órdenes. *Mapa Geológico de España 1:50.000*. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.
- DeGroot, R. (1974) Quantitative analysis of pediments and fluvial terraces applied to the Basin of Monforte de Lemos, Galicia, Spain. *Public. Fysisch. Geografischem Bodem Kundig Laboratorium. Univ. Van Amsterdam* nr 22, 1974.
- Devoy, R.J.N.; Delaney, C.; Carter, R.W.G. & Jennings, S.C. (1996) Coastal stratigraphies as indicators of environmental changes upon european coasts in the Late Holocene. *Journal of Coastal Research* 12, 564-588.
- Engels, J.P. (1974) Precambrian complexes in the hercynian of the North-Western Peninsula. *Conference Liblice "Precambrian des zones mobiles de l'Europe"*. 1972.

Escuer-Sole, J.; Vidal-Romaní, J.R. (1987) Facies y modelo local de los depósitos aluviales de la cuenca del río Mero y península de Sada (A Coruña, Galicia, NW Spain). Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe 11, 69-83.

Fernández-Pompa, F. et al., (1975) Hoja 22: Pontedeume. Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Flor, G. (1992) Tipología, catalogación y tendencias de los procesos de erosión/sedimentación de los campos dunares de la costa de Galicia (NW de España). *Thalassas* 10, 9-39.

Galán Arias, J. et al (1981) Hoja 45: Betanzos. Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Galán-Arias, J.; Fernández-Rodríguez Arango, R. (1981) Hoja 120: Padrón. Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Gascoyne, M. (1992) Geochemistry of the actinides and their daughters. In: Ivanovich, M., Harmon, R.S. (eds.) *Uranium-series disequilibrium: applications to Earth, marine, and environmental sciences*. Clarendon Press, Oxford, pp. 34-61.

Gilg, H.A.; Hall, A.M.; Ebert, K.; Fallick, A.E. (2013) Cool kaolins in Finland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 392, 454-462.

González Harguindey, J (2000) Mapa litológico de Galicia 1:200.000. Proxecto Terra. Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia. (<http://proxectoterra.coag.es/cartografia/>)

González-Lodeiro, F. et al., (1982) Mapa Geológico de España 1:200.000. Santiago de Compostela. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Granja, H.; Carvalho, G. (1992) Dunes and Holocene deposits of the coastal zone of Portugal, north Mondego cape. In: Carter R.W.G.; Curtis, T.G.F. and Sheethy-Skeffington, M.J. (eds). *Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation*. Proceedings of the Third European Dune Congress, Galway, Ireland, 43-50.

Granja, H.; Carvalho, G. (1995) Sea level changes during the Pleistocene-Holocene in the NW coastal zone of Portugal. *Terra Nova* 7, 60-67.

Gutiérrez-Becker, L. (2008) Caracterización de los sistemas dunares costeros del NW ibérico y su evolución durante el Cuaternario. Universidad de Coruña. Tesis doctoral.

Hernández-Urroz, J.; González-Lodeiro, F. (1982) Hoja 152: Villagarcía de Arosa. Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Lommertzen, K. (2011) Landscape Genesis. Marine and River Terraces around the Miño Estuary. Wageningen University and Research Centre y Universidade da Coruña. Tesis doctoral.

López-Cancelo, L. (2004) Cambios paleoambientales en el NW peninsular, durante el Holoceno, determinados a partir del estudio de foraminíferos bentónicos. Universidad de A Coruña. Tesis doctoral.

McDougall, I. (1979) The present status of the geomagnetic polarity time scale. In M.W. McElhinny (ed.): *The Earth: its origin, structure and evolution*, Academic Press, London, 543pp.

Monteserín-López, V. Y Fernández-Pompa, F. (1975) Hoja 21: La Coruña. Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Mosquera-Santé, M.J (2000) Evolución post-glaciación del nivel del mar en el NO de la Península Ibérica: El caso del golfo Ártabro. Universidad de A Coruña. Tesis doctoral.

Naval-Balbín, A.; Iglesias-Ponce de León, M.; Ruiz-Arias, F. (1981) Hoja 46: Guitiriz. Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME, Madrid. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

Nieto, M.I.; Vidal-Romaní, J.R. (1989) Niveles marinos y depósitos continentales antiguos en el borde costero entre Cabo Prior y Cabo Prioriño (A Coruña, Galicia, España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 14, 67-78.

Nonn, H. (1966) Les régions cotières de la Galice (Espagne). Etude géomorphologique. Publications de la Faculté des lettres de L'Université de Strasbourg. Foundation Baulig. Tomo III. 591 pp.

Pareto, L. (1865) Note sur les subdivisions que l'on pourrait établir dans les terrains tertiaires de l'Apennin septentrional. *Bulletin de la Société Géologique de France* 2, 210-277.

Río-Barja, F.J.; Rodríguez-Lestegás, F. (1992) Os Ríos Galegos. Morfoloxía e réxime. Consello da Cultura Galega. Santiago de Compostela. España. 303pp.

Roucoux, K.H.; Tzedakis, P.C.; de Abreu, L.; Shackleton, N.J. (2006) Climate and vegetation changes 180.000 to 345.000 years ago recorded in a deep-sea core of Portugal. *Earth and Planetary Science Letters* 249, 307-325.

Santos, L.; Vidal-Romaní, J.R. (1993) El lagoon de Seselle: un episodio de la transgresión holocena en la Ría de Ares (A Coruña, Galicia, España). Datos geomorfológicos, sedimentarios y paleoecológicos. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 18, 163-174.

Schumm, S.A. (1977) *The fluvial System*. Wiley, New York, USA.

Schumm, S.A. (1993) River response to baselevel change: implicatios for sequence stratigraphy. *Journal of Geology* 101, 279-294.

Soares de Carvalho, G.; Granja, H.M.; Loureiro, E.; Heriques, R. (2006) Late Pleistocene and Holocene environmental changes in the coastal zone of Northwestern Portugal. *Journal of Quaternary Science* 21, 859-877.

Summerfield, M.A. (1991) Fluvial landforms. En: *Global Geomorphology*. Longman Scientific and Technical. 537pp.

Teixeira, C. (1952). Os terraços da parte portuguesa do rio Minho. *Comunicações dos serviços geológicos de Portugal*, Lisboa. Nº 33, 5-29.

Trinidade, M.J.; Prudêncio, M.I.; Sanjurjo-Sánchez, J.; Vidal-Romaní, J.R.; Ferraz, T.; Fernández-Mosquera, D.; Dias, M.I. (2016) Post-depositional processes of elemental enrichment inside dark nodular masses of an ancient aeolian dune from A Coruña, Northwest Spain. *Geologica Acta* 11, 231-244.

Vidal-Romaní, J.R. (1974) Sedimentos marinos antiguos en la costa de A Coruña. Trabajo inédito. Depósito del Laboratorio Xeolóxico de Laxe.

Vidal-Romaní, J.R. (1977) Los depósitos sedimentarios del valle del Mero (La Coruña). *Gallaecia* 2, 37-46.

Vidal-Romaní, J.R. (1978) El periodo Cuaternario en Galicia. *Gallaecia* 3/4 Separata.

Vidal-Romaní, J.R.; Pérez-Alberti, A.; Grajal, M. (1979) Testimonios de climas semiáridos en el Cuaternario de Galicia. En: *Actas de la 3ª reunión nacional. Grupo Español de trabajo del Cuaternario. El Cuaternario en medios semiáridos*. Inst. Geog. Aplic. C.S.I.C. Madrid.

Vidal-Romaní, J.R. (1996) Geografía de Galicia. En: *Geomorfología de Galicia*. Tomo XVII. Hércules Ediciones S.A. A Coruña, 36-60.

Vidal-Romaní, J.R.; Bao, R.; Mosquera, M. y Salas, B. (1997) Pruebas de los cambios en el nivel del mar en el Noroeste de la Península Ibérica después del último periodo glacial. II Symposium sobre el Margen Ibérico Atlántico, Vol. de Resúmenes, Cádiz, 139-140.

Vidal-Romaní, J.R.; Santos-Fidalgo, L.; López-Cancelo, L.; Mosquera-Santé, M.J.; Leira-Campos, M (2000) Storminess variation along the atlantic seaboard of Europe over the last 2000 years: Holocene storminess from coastal barriers in North-West Spain. (Internal report).

Vidal-Romaní, J.R. (2002) Relieve actual de Galicia. En: Galicia. Naturaleza. Tomo XXXVI: Historia Natural. Geología. Hércules de Ediciones, S.A.. Capítulo 6; pp.: 304-341.

Vidal-Romaní, J.R. (2015) La Geología de Galicia o cómo armar un rompecabezas. Discurso de Ingreso en la Real Academia Gallega de Ciencias. Santiago de Compostela.

Vidal-Romaní, J.R.; Grandal D'Anglade, A.; Vaqueiro-Rodríguez, M (2017) El mundo de una mujer llamada Elba hace 9300 años. Cadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe 39, 11-22.

Vilas Martín, F.; Nombela, M.A. (1986) The evolution of Corrubedo beach-lagoon complex and evidence of human occupation (1045-695 BP), Galicia, NW Spain. Thalassas 6, 29-35.

Viveen, W.; Braucher, R.; Bourlès, D.; Schoorl, J.M.; Veldkamp, A.; Balen, R.T.; Wallinga, J.; Fernández-Mosquera, D.; Vidal-Romaní, J.R.; Sanjurjo-Sánchez, J. (2012) A 0.65 Ma chronology and incision rate assessment of the NW Iberian Miño River terraces based on  $^{10}\text{Be}$  and luminescence dating. Glob. Planet. Chang. 94–95, 82–100.

Viveen, W. (2013) Multi-scale Tectonic Controls on Fluvial Terrace Formation in a Glacioeustatically-dominated River System: Inferences From the Lower Miño Terrace Record. Wageningen University, Wageningen (The Netherlands). Tesis doctoral. 222pp.

Viveen, W.; Schoorl, J.M.; Veldkamp, A.; Balen, R.T. (2014) Modelling the impact of regional uplift and local tectonics on fluvial terrace preservation. Geomorphology 210, 119-135.

Internet:

IGME: [www.igme.es](http://www.igme.es)

SITGA: [mapas.xunta.gal](http://mapas.xunta.gal)



## Capítulo 3.

Principios de luminiscencia y la señal OSL.



### 3. Principios de luminiscencia y la señal OSL.

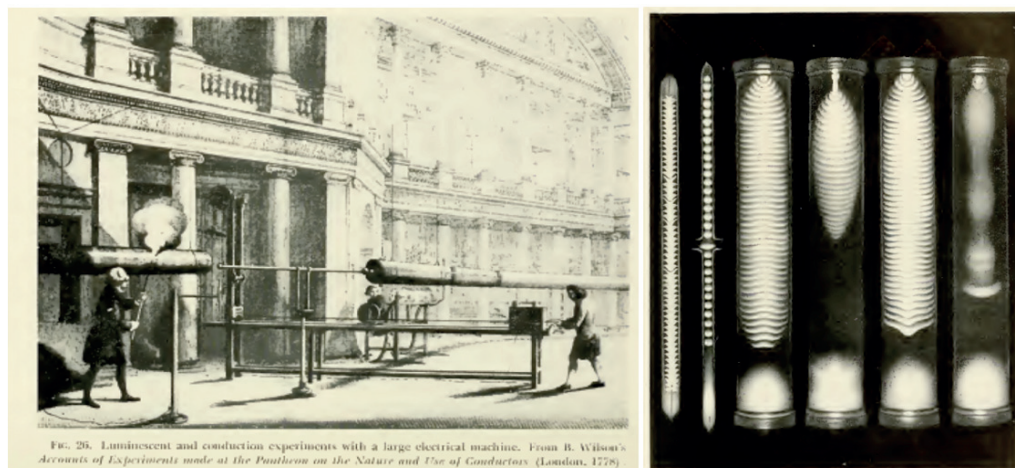
La datación mediante luminiscencia OSL abarca, como la mayoría de técnicas analíticas, una amplia diversidad de campos y que engloban, entre otros, los diferentes tratamientos físicos y químicos aplicados sobre las muestras extraídas para la separación y purificación de los materiales a partir de los cuales se obtiene la señal de luminiscencia -OSL en el caso del cuarzo o IRSL en el caso del feldespato. También incluye aspectos tecnológicos asociados a los instrumentos de medida, aspectos teóricos como los modelos físicos que explicarían el comportamiento de las cargas dentro de la red cristalina de los minerales en base a la mecánica cuántica, los distintos protocolos desarrollados para obtener la señal de luminiscencia, los diversos modelos estadísticos con los que manejar un número variable de datos y su distribución, o aquellos aspectos relacionados con las medidas de radiación ionizante natural del medio y su estimación. Por todo ello, en el siguiente apartado se describirán de manera simplificada algunos de estos aspectos básicos y más relevantes de la técnica de datación mediante luminiscencia OSL e IRSL empleados en el presente trabajo, comenzando por una breve introducción histórica, describiendo el modelo físico básico aceptado de forma generalizada, el modo de extraer la señal o las características de la misma. También se explicará el significado de la dosis equivalente ( $De$ ) y se describirá el protocolo empleado para la estimación de la misma, su metodología y los criterios de aceptación establecidos.

#### 3.1. Introducción histórica.

La capacidad de algunos minerales de almacenar energía y disiparla emitiendo algún tipo de señal luminosa ya fue observada en la antigüedad. Por ejemplo, Aristóteles o Plinio ya hacían referencia en algunas escrituras sobre rubíes luminiscentes. Más tarde, en 1603 Vincenzo Cascariolo, zapatero boloñés y alquimista aficionado, constata que “un sulfuro de bario nativo sometido a calcinación podía absorber la luz del sol y emitirla, posteriormente, en la oscuridad” (Harvey, 1957), y en 1663 se llevaban a cabo los primeros estudios científicos de luminiscencia por Robert Boyle en la Royal Society of London. Ya en el s.XX se desarrolla el conocimiento de la red cristalina de los materiales, la emisión de diferentes tipos de luz detectados en tubos de vacío (Fig. 3.1) o mediante foto-multiplicadores, o el estudio de la dosimetría realizado por investigadores como D. Curie, H.W. Leverenz, D.J. McDougall. En 1953 aparece uno de los primeros trabajos en termoluminiscencia (una variante que extrae la señal de luminiscencia mediante un estímulo térmico) sobre materiales cristalinos, realizado por F. Daniels (Daniels et al., 1953). A finales de los años sesenta del mismo siglo, y a modo de ejemplos, D.W. Zimmerman aplica la señal de termoluminiscencia (señal TL) para datar cerámicas antiguas (Zimmerman, 1971), G.V. Morozov (1968) para datar sedimentos cuaternarios y, ya en los años setenta, M.J. Aitken emplea esta señal TL para datar cenizas volcánicas asociadas a la cultura minoica (Aitken, 1971). Ya en los ochenta S.W.S. McKeever, D.J. Marshall y el recién mencionado M.J. Aitken (Aitken, 1998) impulsarán el desarrollo de la datación por luminiscencia de cerámicas y depósitos cuaternarios. Así, hasta llegar a los primeros trabajos



empleando la señal de luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) llevados a cabo por D.J. Huntley (1985) con cuarzo y feldespato y Hütt (1988) que empleará un estímulo infrarrojo (IR) para feldespato obteniendo la señal IRSL.



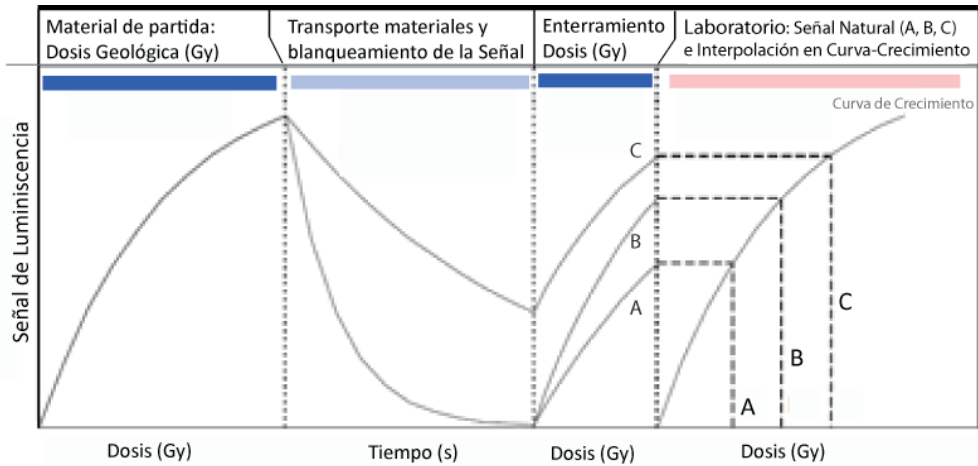
**Figura 3.1.** (Izq.) Experimentos de luminiscencia y conducción eléctrica (Wilson, 1778). (Dcha.) Ensayos de electro-luminiscencia empleando gases enrarecidos en tubos de vacío (De la Rue and Müller, 1878); (Imágenes extraída de Harvey, 1957).

A lo largo de los años ochenta y noventa se desarrollarán los aspectos técnicos y de instrumentación para la datación OSL (Böttter-Jensen, 1997) y el desarrollo del lector RISO-TL/OSL (Universidad Técnica de Dinamarca: <http://www.nutech.dtu.dk>). Ya en el año 2000, A.S. Murray y A.G. Wintle establecen el protocolo SAR (*Single aliquot Regenerative-dose*) como método de datación absoluta estandarizado (Murray y Wintle, 2000) y a día de hoy la técnica cuenta con entidades como el Abersystwyth Luminescence Research Laboratory (Aberystwyth University, Reino Unido), el Nordic Laboratory for Luminescence Dating (NLL) junto con el Center for Nuclear Technologies (DTU Nutech – Technical University of Denmark) o el Laboratoire de datation para luminescence (LUX – Le Geotop) de Montreal (Canadá) dedicados al desarrollo de la técnica y formación de investigadores.

### 3.2. Principios de luminiscencia

Desde un punto de vista físico todos los minerales se pueden considerar como semiconductores, es decir, que pueden actuar como conductores (de electrones) o como aislantes, dependiendo de determinadas condiciones. Así, cuando estos minerales están bajo los efectos de la radiación, o a altas temperaturas, o bajo el efecto de estímulos como la luz solar, etcétera, se puede producir una movilización de los electrones a escala atómica. Respecto a la técnica de datación mediante luminiscencia, los materiales más empleados son el cuarzo y los feldespatos debido a su ubicuidad, resistencia a la meteorización y capacidad de almacenar cargas en su red cristalina cuando permanecen bajo los efectos de la radiación ionizante del medio y aislados de la luz solar o altas temperaturas, en condiciones de enterramiento. Estas cargas pueden ser liberadas en forma de fotones al aplicar un estímulo adecuado, obteniéndose así una señal de luminiscencia. Si este estímulo es térmico se producirá una señal de termoluminiscencia (señal TL), si el estímulo es lumínico se generará una señal de luminiscencia ópticamente estimulada (señal OSL- *Optically Stimulated Luminescence*) y si el estímulo es mediante infrarrojos, se generará la señal IRSL (*Infra-Red Stimulated Luminescence*).

Estas señales se analizan y cuantifican en el laboratorio para poder estimar la edad de enterramiento en función de la radiación natural absorbida por los materiales que componen el medio sedimentario durante el mismo (Huntley, 1985). Así, a medida que transcurre un mayor tiempo de enterramiento de estos minerales (cuarzo o feldespato) se incrementa el tiempo de exposición a la radiación natural ionizante, redistribuyéndose y almacenándose un mayor número de cargas dentro de su propia red cristalina, hasta un límite de saturación (Fig. 3.2). Esta señal (OSL, TL o IRSL) se corresponde a la dosis de radiación ionizante recibida durante dicho periodo de tiempo, recibiendo el nombre de dosis equivalente ( $D_e$ ), que puede ser estimada si se emplea la metodología adecuada. Conociendo, además, la tasa de radiación natural del medio por unidad de tiempo, se puede calcular la edad de enterramiento mediante la ecuación de Aitken (1985) dividiendo la dosis equivalente estimada a partir de la señal de luminiscencia (OSL, TL o IRSL) de los materiales entre la dosis anual, como se explicará posteriormente.



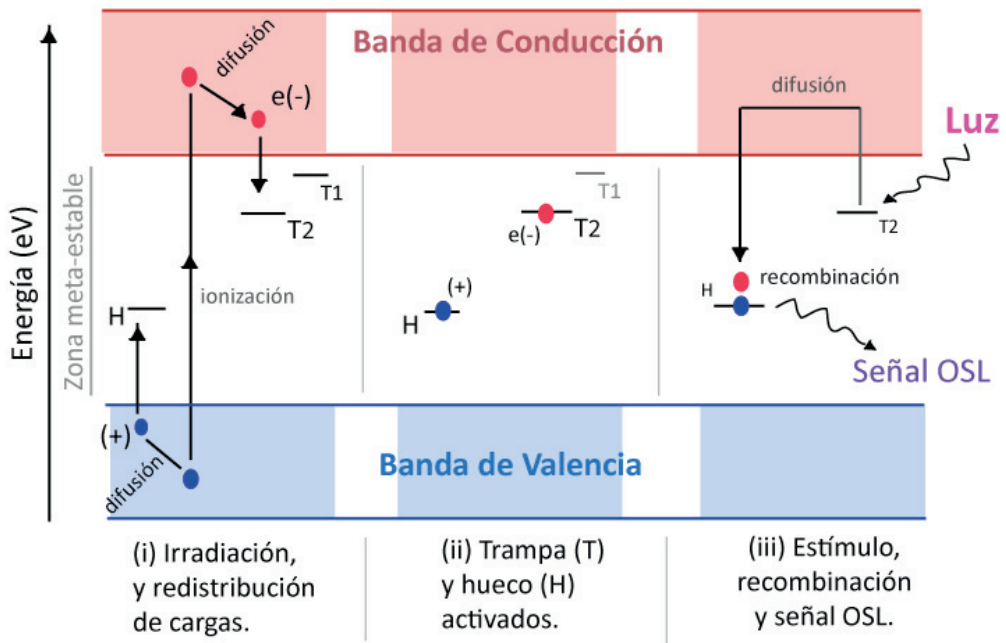
**Figura 3.2. Esquema de la señal de luminiscencia (OSL o IRSL) y la dosis:** Señal natural del material de partida (dosis geológica); blanqueamiento de la señal durante el transporte de los sedimentos; Deposición y enterramiento de los materiales produciéndose una redistribución de cargas por acción de la radiación ionizante natural; estimación de la Dosis Equivalente (*De*) interpolando la Señal natural de luminiscencia extraída de las muestras A, B y C en la curva de crecimiento generada, para cada una de ellas, mediante el método regenerativo y aplicando el protocolo SAR (Murray and Wintle, 2000) en el laboratorio (imagen modificada extraída de Bailey y Arnold, 2006).

### 3.2.1 Modelo físico de trampa-hueco (*trap-hole*).

Desde una perspectiva física, la radiación ionizante actúa sobre los átomos que conforman la red cristalina de los minerales provocando una redistribución de cargas (electrones) que difunden desde niveles energéticamente estables, en la banda de valencia, hacia niveles inestables, en banda de conducción (Fig.3.3). Entre ambos existe un espacio o nivel meta-estable (*forbidden band gap*) que incluye trampas (*traps*) originadas por defectos en la red cristalina –debido, por ejemplo, a impurezas o a ausencia de átomos, etcétera- en las cuales los electrones pueden permanecer retenidos o atrapados durante intervalo de tiempo muy variables, si bien, se ha estimado que determinado tipo de trampas pueden retener cargas de manera estable durante miles o millones de años (Aitken, 1998). Como se comentó anteriormente, cuanto mayor es el tiempo de exposición a la radiación ionizante sin que se estimule el retorno de esas cargas a la banda de conducción -lo que ocurre en sedimentos durante su enterramiento- mayor es la ionización recibida y más cargas son redistribuidas aumentando el número de electrones atrapados. No obstante, y como también se comentó, existe un nivel de saturación en el cual todas las trampas posibles ya están ocupadas y en el cual se detiene esta transferencia de cargas aunque la radiación ionizante continúe ejerciendo su influencia (Smith y Rhodes, 1994).

Paralelamente, y debido también a la radiación ionizante recibida, se produce otro tipo de redistribución de cargas en donde se generan huecos (*holes*) debido a que algunos electrones, situados en el nivel meta-estable

y próximos a la banda de valencia, pasan a sustituir a aquellos que fueron desalojados de la misma hacia la banda de conducción (Preusser, 2008). Estos huecos, sin carga alojada, pasan a estar activos y se denominan centros de recombinación (*recombination centers* o *RC*), estando situados a mayor profundidad que las trampas de OSL, considerando una hipotética sección transversal de la red cristalina. Estos centros de recombinación tendrán, bajo este modelo físico, un papel fundamental para generar la señal de luminiscencia ya que una fracción de los electrones desalojados de las trampas -al recibir, por ejemplo el estímulo luminoso- va a recombinar con aquellos centros de recombinación activos emitiendo señal OSL. A este proceso se le denomina recombinación radiactiva (*radiative recombination*). No obstante, la mayoría de la energía se libera en forma de calor y una pequeña fracción de electrones vuelve a quedar atrapada (*re-trapping*) al ser estimulado el mineral con luz, calor o mediante infrarrojos.

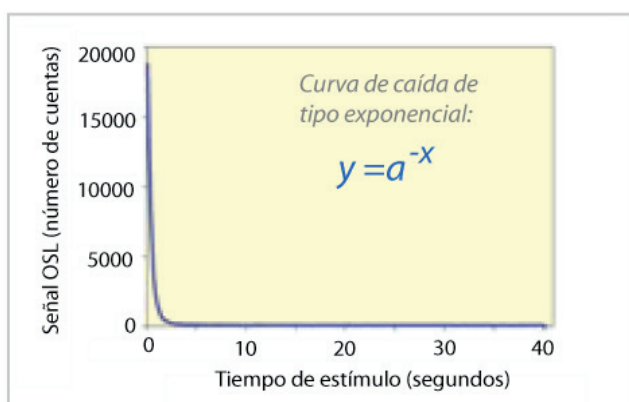


**Figura 3.3.** Niveles energéticos correspondientes a las bandas de valencia y de conducción (entre ambas la zona meta-estable). Las flechas indican el proceso de redistribución de cargas ( $e^-$  y  $+$ ) según el modelo trampa-hueco ( $T_1$  y  $T_2$  trampas y ( $H$ ) hueco). en el evento de irradiación (i), activación de los centros de recombinación (ii) y la posterior recombinación y emisión de fotones (señal OSL) al recibir estímulo lumínico (iii). ( $T_1$  y  $T_2$  Trampas; ( $H$ ) Hueco; ( $e^-$ ) Electrón; ( $+$ ) Carga positiva (idea de la figura tomada de Duller, 2008).

Existen diferentes tipos de trampas a distinta profundidad –dentro de esa hipotética sección transversal de la red cristalina- correspondientes a niveles de energía determinados y con una estabilidad temporal (*life-time*) característica, siendo más estables las cargas retenidas en las trampas más profundas. Si se trabaja con señal OSL es conveniente centrar el análisis en los niveles energéticos correspondientes a las trampas OSL (*OSL traps*) (Bøtter-Jensen et al., 2003). Generalmente, para el cuarzo se hace uso de un haz de luz azul de 450nm, estimulándose una señal OSL, y para feldespatos el estímulo externo corresponde a una fuente de infrarrojos (780nm), obteniendo una señal IRSL. Así, es fácil entender como la luz solar, mucho más energética, libera de forma natural todas las cargas retenidas en las trampas, blanqueándolas (*bleaching*). A modo informativo, existe otro tipo de señal, la señal de termoluminiscencia (TL), no empleada en el presente trabajo, con sus propias trampas TL y niveles energéticos correspondiente, para cuya obtención se aplica un estímulo térmico de hasta 450°C o incluso superior (Huntley, 1985).

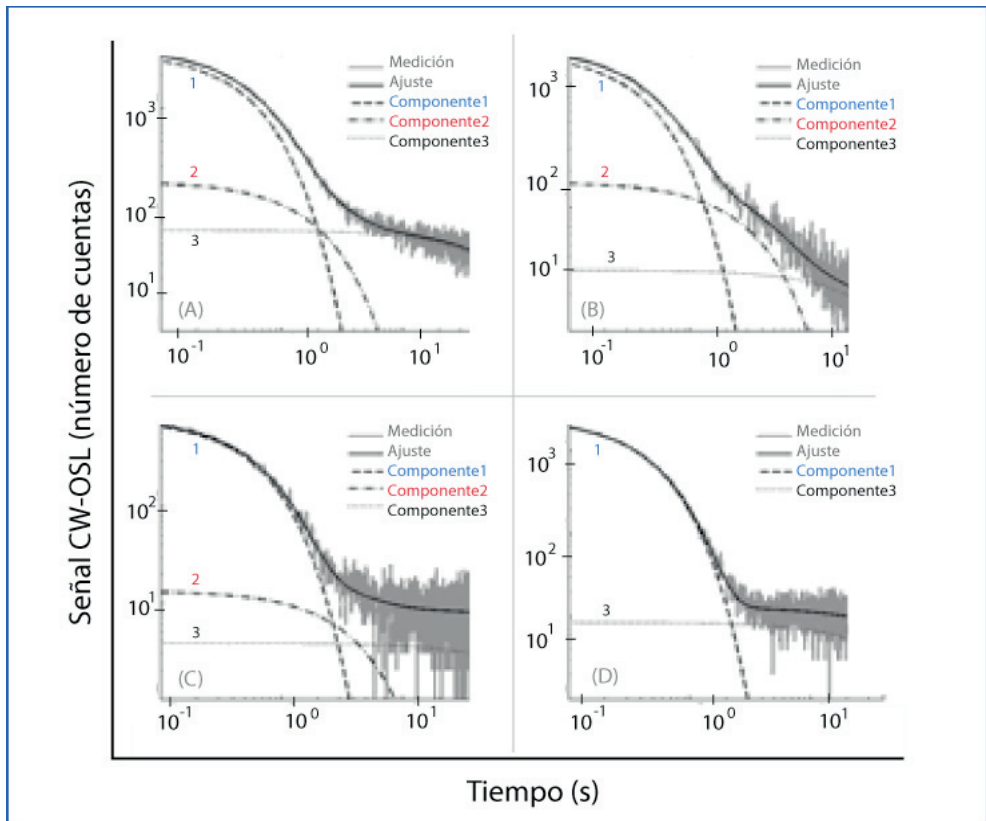
### 3.3. Señal de luminiscencia OSL

El estímulo lumínico que provoca una recombinación de cargas -esto es, recombinación de electrones entre trampas y huecos (*traps-hole recombination*)- y que genera a su vez la señal OSL, se puede aplicar de varias formas en función de la propia muestra y los objetivos, si bien, para OSL generalmente se emplea un estímulo con onda e intensidad continuas (*Continuous wave OSL-signal stimulation o CW-OSL*). De esta manera, la propia señal OSL de onda e intensidad continua aparece como una curva de caída (*response decay curve*) que decrece de modo exponencial a lo largo del tiempo de estímulo. Así, el número de cuentas detectadas y que se corresponde con la intensidad de la señal emitida en forma de fotones, cae exponencialmente, observándose un elevado número de cuentas en los primeros segundos de estímulo y decreciendo hasta niveles de fondo durante el tiempo restante (Fig. 3.4).



**Figura 3.4.** Típica representación de la caída de tipo exponencial que experimenta de la curva de respuesta de la señal OSL, representando los fotones liberados y detectados como cuentas por unidad de tiempo de exposición a un estímulo lumínico de onda e intensidad continua (imagen modificada de Duller, 2008).

El hecho de que la caída de la señal sea exponencial –y no lineal– se debe a que la señal es, en sí, una suma de señales relacionadas con los distintos tipos de trampas. La señal OSL para el cuarzo viene dada, al menos, por tres componentes: rápida, media y lenta (Bailey *et al.* 1997; Jain *et al.* 2003) –si bien, en ocasiones se ha detectado una cuarta componente ultra-rápida. (Fig. 3.5). En los protocolos empleados, como el método regenerativo que se explicará más adelante (ver apartado 3.4.2.), la componente rápida aparece generalmente durante los primeros 0.5s de estímulo luminoso y su estabilidad temporal es de  $10^8$  años (debido, y simplificando, a una sección óptica transversal más larga que el resto de componentes). También es la componente que mejor se blanquea al recibir la luz solar y presenta así una mayor probabilidad de relajar y liberar sus cargas (Wintle y Murray, 2006). Todo ello hace de esta señal rápida la componente más fiable, mientras que la señal media y lenta vienen generadas por otro tipo de estímulos, transferencia de cargas y carga residuales, ajenas a la señal OSL deseada, por lo que se las incluye como señal de fondo.



**Figura 3.5.** Componentes rápida, media y lenta (1,2 y 3 respectivamente) y ajuste en la que se puede descomponer la curva de caída de la señal CW-OSL (Medición) para cuatro muestras distintas (A,B,C y D), enfrentando el número de cuentas y el tiempo de exposición a estímulo lumínico, en escala logarítmica (imagen modificada extraída de Cuninham y Wallinga 2010).

Así, para eliminar señales OSL de menor estabilidad u otras señales no deseables se aplican tratamientos térmicos (*pre-heat*) antes de la medición de la propia señal OSL (Murray and Wintle, 1999). No obstante, estos tratamientos térmicos a distintas temperaturas e intervalos generan variaciones en el comportamiento luminiscente de los materiales analizados, denominados variaciones de sensibilidad de la señal de luminiscencia, y que resulta imprescindible corregir (Roberts, 1994).

La curva de respuesta para cada una de las componentes de la señal OSL se ajusta a la expresión de tipo exponencial bajo la expresión  $I = I_0 \dots \exp^{(D/D_0)}$ , en donde  $I$  es la intensidad de la señal a dosis  $D$ , e  $I_0$  es la intensidad de la señal a dosis  $D_0$ , que es la dosis característica calculada para cada componente (Singarayer and Bailey, 2003; 2004). El ajuste de la curva a una ecuación de tipo exponencial implica que, una vez llegados a un umbral situado en la parte superior de la curva, se alcancen niveles de saturación de la señal OSL en el cual se incrementa la incertidumbre (Murray et al. 2002) y cuyo efecto y comportamiento no es bien conocido. Es por ello por lo que, para muestras antiguas, es importante tener en cuenta la zona de la curva de crecimiento en la cual interpola la dosis equivalente ( $De$ ) estimada a partir de la componente rápida y para granos de cuarzo, estableciéndose, por convenio, que para no incurrir en este tipo de error, esta  $De$  debe ser, a lo sumo, inferior al doble del valor de dosis característica de la curva, esto es,  $De < 2 * D_0$  (Wintle and Murray, 2006). Bajo esta hipótesis se asume que todas las curvas individuales descritas por cada alícuota son similares, permitiendo el cálculo de ese valor  $D_0$  a partir de la curva característica estimada mediante promedios (Burbidge et al., 2006) y que se sitúa un 15% por debajo del nivel de saturación. No obstante, frente a señales muy variables y poco intensas, los valores de saturación de referencia resultan más arbitrarios.

Como se ha comentado, es conveniente aislar la componente rápida de la señal OSL correspondiente, de manera hipotética, al número de cuentas incluidas dentro de los 0.5 primeros segundos estímulo –para la señal IRSL, el intervalo de tiempo es de 4 o 5 segundos (Wallinga, 2000). No obstante, también es importante extraer la señal de fondo asociada a las componentes media y lenta, no deseables, para sustraer de la señal rápida la señal correspondiente al ruido o fondo a partir de las fórmulas matemáticas correspondientes (Ver apartado 5.2.1.). Así, para la extracción de esta señal de fondo se puede utilizar el método de integración tradicional LBG (*Late background*) o el método EBG (*Early background*) -este último empleado únicamente con la señal OSL. Mediante el método LBG la señal de fondo OSL se corresponderá con el número de cuentas detectados en los últimos cuatro segundos de estímulo (Banerjee et al., 2000), y en el caso de la señal IRSL, en el número de cuentas de los últimos 25 segundos. Por su parte, la señal de fondo extraída mediante el método EBG abarca el intervalo de tiempo inmediatamente posterior al correspondiente a la señal rápida OSL, integrando los cuatro segundos siguientes (Ballarini et al., 2007; Cunningham and Wallinga, 2010).

### 3.4. Estimación de la Dosis equivalente ( $De$ ).

Para determinar la dosis que equivale a la radiación natural que ha incidido sobre los minerales analizados a lo largo del tiempo de enterramiento se han desarrollado numerosos protocolos, siendo el SAR (*Single Aliquot Regenerative-dose*; Murray and Wintle, 2000) el protocolo más empleado desde su aparición para la datación de sedimentos. En este protocolo se extraen y se comparan distintas señales. En el caso de la OSL, se mide la señal OSL natural ( $L_N$ ) a partir de un determinado número de granos de cuarzo de la muestra, a los cuales se denomina alícuota.

Esta señal natural se produce, como se ha comentado, debido a la influencia de la radiación natural del medio. No obstante, sobre la misma alícuota de la que se ha extraído esta señal natural OSL ( $L_N$ ) se aplica, en el laboratorio, un tratamiento lumínico para blanquear totalmente las trampas OSL y eliminar cualquier tipo de señal OSL de estos granos de cuarzo que la conforman. A continuación se induce sobre ellos una dosis radiactiva (a partir, por ejemplo, de una fuente beta) generando de forma artificial una nueva señal OSL, que será la señal OSL regenerada ( $L_x$ ). Esta señal regenerada dependerá de la intensidad de la dosis aplicada por lo que, si este ciclo de blanqueamiento e inducción de dosis se repite un determinado número de veces, a dosis crecientes, se obtienen diferentes señales OSL regeneradas ( $L_{x1}$ ,  $L_{x2}$ ... $L_{xi}$ ) a partir de las cuales, y como se explicará a continuación, se obtendrá un valor de Dosis equivalente ( $De$ ).

En el propio protocolo SAR, además, se analizan las variaciones en la sensibilidad de luminiscencia resultante de los distintos tratamientos a los que se somete a estos granos de cuarzo en los sucesivos pasos que incluye el protocolo, monitorizando su respuesta ante la radiación natural y las distintas dosis artificiales, así como su comportamiento frente las distintas temperaturas que se aplican.

#### 3.4.1. Dosis equivalente y cálculo de la edad de enterramiento.

La estimación del tiempo durante el cual los granos de cuarzo están sometidos a la radiación ionizante natural –radiación cuya energía es cuantificable y que genera una redistribución y acumulación de cargas en la red cristalina del cuarzo y/o feldespato- se realiza mediante la aplicación de un estímulo (lumínico, infrarrojo o térmico) sobre cada una de las alícuotas en las que es dividida la muestra. Como ya se ha comentado, este estímulo es capaz de movilizar estas cargas, y un porcentaje de ellas, al recombinar, emitirán fotones que serán recogidos y cuantificados en equipos de precisión. De esta manera se obtiene un dato numérico de cuentas equivalentes a fotones por unidad de tiempo (p.e. segundos), que será la señal de luminiscencia OSL (o TL o IRSL). No obstante, para darle un sentido a este valor numérico resulta imprescindible conocer la cantidad de radiación ionizante capaz de generarlo, es decir, qué dosis da lugar a ese número de cuentas o señal de luminiscencia y, para ello, se procede a la estimación de la dosis equivalente ( $De$ ) mediante el método regenerativo, metodología cuya explicación se desarrollará posteriormente.

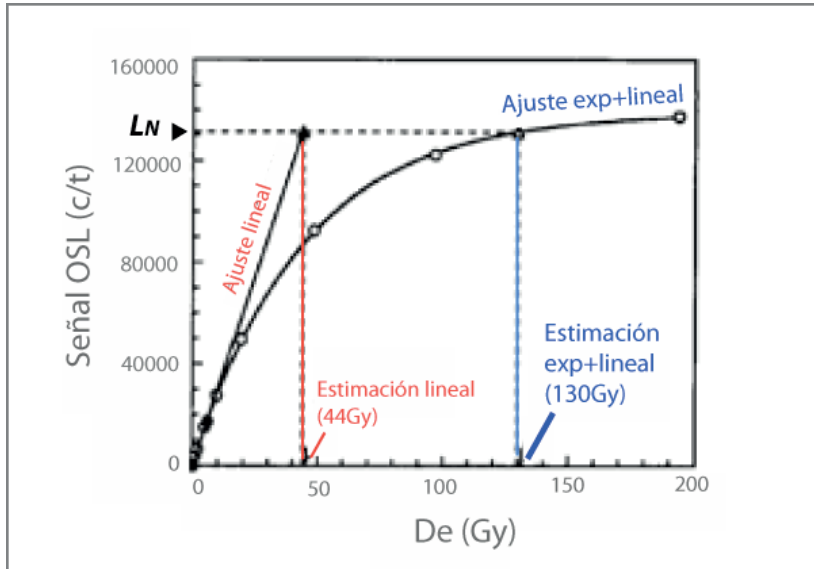


La dosis equivalente se explica, también de manera simplificada, como la dosis capaz de generar el número de cuentas registrado al extraer la señal natural de luminiscencia (ya sea OSL, IRSL, etc.), y se ha definido como “la dosis de radiación artificial (beta o gamma) necesaria para inducir una señal de luminiscencia igual a aquella adquirida después del episodio de blanqueamiento más reciente y que, a menudo, coincide con la dosis a la que estuvo expuesta durante el tiempo de enterramiento” (Aitken, 1998). Mediante este método regenerativo se puede obtener la estimación de la *De* en *Grays* (Gy), en donde 1Gy=1Julio de energía absorbida por kilogramo de materia (S.I.). Además, la radiación natural del medio es cuantificable, estimándose como tasa de radiación ambiental o *Dose-rate* (*DR*), en Grays por unidad de tiempo (Gy/ka) por lo que, teniendo ambos datos, se puede calcular la edad de enterramiento mediante la fórmula (1) cuyas unidades se establecen en “a” (annum) o “ka” (1000a) que hace referencia a la edad en número de años antes de la fecha de medida.

$$\text{Edad de enterramiento (años)} = \frac{\text{Dosis Equivalente (Gy)}}{\text{Tasa de Radiación Ambiental (Gy/años)}} \quad (1)$$

#### 3.4.2. Método regenerativo y curva de dosis-respuesta.

Para la estimación de la *De* mediante la señal OSL (o IRSL) se ha empleado, en el presente trabajo, el método regenerativo (*Regenerative dose*), en el cual, como ya se ha comentado a modo de introducción, después de obtener de una alícuota dada la señal OSL natural ( $L_N$ ) mediante el estímulo adecuado, se procede a un vaciado completo de la trampas OSL aplicando sobre la misma alícuota un estímulo lumínico a alta temperatura que provoque un blanqueamiento de las trampas OSL y, por tanto, de la señal OSL. A continuación, se aplica una dosis radiactiva mediante una fuente beta, capaz de provocar una nueva redistribución de cargas, seguido del estímulo correspondiente para provocar que estas cargas recombinen y extraer así una señal OSL nueva, regenerada de forma artificial ( $L_x$ ). Si estos ciclos de blanqueamiento y radiación se repiten, a dosis crecientes, se obtienen señales OSL regeneradas también crecientes ( $L_{x1}$ ,  $L_{x2}$  ...  $L_{xi}$ ). El propósito de generar estas señales de manera artificial es la construcción de una curva de crecimiento de dosis-respuesta (*Dose-response curve*). En ella, se representarían los puntos correspondientes a las señales regeneradas artificialmente ( $L_{x1}$ ,  $L_{x2}$ ... $L_{xi}$ ) en el eje Y, frente a las dosis beta artificiales aplicadas para generar dichas señales ( $D_1$ ,  $D_2$  ...  $D_i$ ) en el eje X. Una vez obtenida la curva, se podría obtener la dosis correspondiente a la señal OSL natural ( $L_N$ ) mediante interpolación (Fig. 3.6). Esta dosis sería la dosis equivalente (*De*), y el ajuste de la curva respondería a uno de tipo exponencial + lineal.



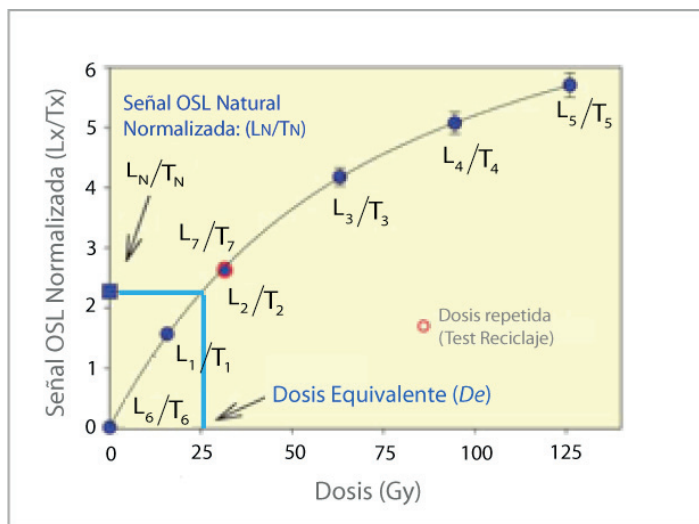
**Figura 3.6. Método regenerativo y curva de respuesta:** Cada uno de los puntos de la curva ha sido regenerado a distintas dosis a excepción de la señal natural OSL ( $L_N$ ) (medida en cuentas por unidad de tiempo) la cual se interpola dentro de esta curva de crecimiento mediante un ajuste exponencial+lineal (exp+lineal) para estimar la dosis equivalente ( $D_e$ ) correspondiente (figura modificada, tomada de Roberts y Galbraith, 1999).

El análisis estadístico del conjunto de estimaciones de dosis individuales ( $D_e$  individuales) obtenidas a partir de la señal que ofrece cada una de las alícuotas en las que se divide una muestra dada, proporcionará la estimación de la dosis muestral ( $D_e$  muestral). Para cada muestra se analiza la señal de un determinado número de alícuotas, a modo de medidas independientes para que su tratamiento estadístico sea significativo. Estas alícuotas, a su vez, están conformadas por un número determinado de granos, que puede ir de uno solo (*single grain*) a varias decenas (*single aliquot o multi-grain*). No obstante, en el caso de alícuotas multi-grano, la señal emitida por cada una de ellas puede variar de forma considerable, máxime si se tiene en cuenta que menos del 10% de los granos que conforman la alícuota emiten señal OSL (Murray and Roberts, 1997; Duller et al., 2000).

Por otra parte, la eficiencia de luminiscencia o emisión de fotones por unidad de carga atrapada y la proporción de cargas que quedan atrapadas por unidad de ionización pueden variar entre la medida de la señal natural ( $L_N$ ) y regenerada ( $L_x$ ). Estas variaciones en la sensibilidad de luminiscencia se deben, entre otros aspectos, a que la dosis natural se produce a lo largo del tiempo de enterramiento y la dosis inducida en el laboratorio, de igual magnitud o superior, es inducida en menos de una hora en el laboratorio.

También influirán los distintos tratamientos lumínicos y térmicos que incluye el protocolo SAR (Wintle and Murray, 1999; Murray y Wintle, 2000) y que pueden generar desviaciones en la propia curva de crecimiento

influyendo en la fiabilidad de la interpolación. Por ello, para monitorizar y corregir estas variaciones, y sustraer así su efecto en las estimaciones, se ha desarrollado un método de normalización incluido en el protocolo SAR -ambos explicados en el siguiente apartado- que permitirá construir la curva de dosis-respuesta, ya no en función de la señal regenerada ( $L_{x1}$ ,  $L_{x2}$  ...  $L_{xi}$ ), sino a partir del dato normalizado para cada señal OSL, natural o regenerada ( $L_N/T_N$  o  $L_x/T_x$ ) en el eje Y, frente a su dosis correspondiente en el eje X. Este gráfico se denomina curva de dosis-respuesta de la señal corregida a efectos de sensibilidad (*Sensitivity-corrected dose-response curve*) (Fig. 3.7).

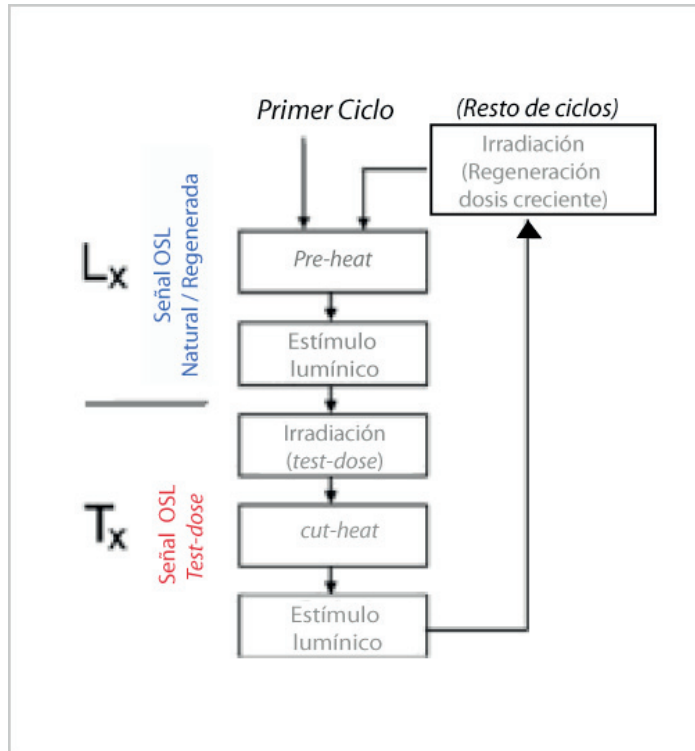


**Figura 3.7.** Curva de crecimiento de la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ). Se representa la señal OSL natural normalizada ( $L_N/T_N$ ), la señal correspondiente al test de reciclaje corresponde (Dosis repetida) y la interpolación para estimar la dosis equivalente ( $De$ ) (imagen modificada y extraída de Duller, 2008).

### 3.4.3. Descripción del protocolo SAR para OSL.

El protocolo SAR (Murray and Wintle, 2000) se basa en una sucesión de ciclos y en cada uno de ellos, una sucesión de pasos. Estos pasos son, en primer lugar irradiación a dosis determinada, seguida de un tratamiento térmico (*pre-heat*) y del estímulo lumínico para extraer y registrar la señal OSL de cada ciclo ( $L_N$  o  $L_1$ ,  $L_2$  ...  $L_i$ ). Además, y de forma continuada, cada ciclo incluye los pasos correspondientes a la regeneración y extracción de la señal de normalización o *Test-dose* aplicándose la misma dosis (a baja intensidad), seguido de otro tratamiento térmico (*cut-heat*) y un estímulo para extraer y recoger la señal OSL de este *Test-dose* ( $T_N$  o  $T_1$ ,  $T_2$  ...  $T_i$ ). Por último, se ejecuta un blanqueo de las trampas OSL mediante un estímulo lumínico a alta temperatura, para pasar así al siguiente ciclo.

El número de ciclos que se ejecutan es variable, aplicándose, al menos seis, cada uno con una dosis inducida determinada. En el primero se mide la señal natural OSL ( $L_N$ ) a dosis inducida de 0Gy. En el segundo, tercero y cuarto se regenera paulatinamente una señal creciente para conformar la curva de crecimiento de dosis respuesta ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ), para lo cual, el intervalo de tiempo de irradiación se incrementa en función de la  $D_e$  observada en algunos de los test previos al protocolo, como el *pre-heat test* –y que se explicará en el siguiente apartado (3.4.3.1.). Por último, las señales obtenidas en el quinto y el sexto ciclo no solo se incluyen en la curva de crecimiento sino que permiten monitorizar las variaciones de sensibilidad que se puedan producir a lo largo del protocolo: en el quinto ciclo ( $L_5$ ) la dosis inducida es de 0=Gy, correspondiéndose con el test de recuperación, y en el sexto ciclo ( $L_6$ ) se repite la dosis del segundo o tercer ciclo, correspondiéndose con el test reciclaje (Fig. 3.8). Estos últimos aspectos, el test de reciclaje y recuperación se explicarán más adelante (ver apartado 3.4.3.3.).



**Figura 3.8.** Esquema simplificado del protocolo SAR, incluyendo regeneración de dosis, tratamiento térmico (*pre-heat*), estímulo lumínico para extraer la señal OSL y test de normalización de la señal *Test-dose* con su propio tratamiento radiactivo para regenerar la señal de normalización a dosis bajas, su tratamiento térmico (*cut-heat*) y estímulo lumínico correspondiente (modificado y extraído de Preusser, 2008)

#### 3.4.3.1. Tratamientos térmicos

Cuando se produce una redistribución de cargas, debido a la radiación ionizante natural o artificial, algunas de estas cargas, y asumiendo el modelo seguido de trampa-hueco, quedan atrapadas en trampas someras o cerca de la banda de conducción. Estas trampas someras son inestables en el tiempo e insensibles al estímulo luminoso ya que no emiten señal OSL -las trampas OSL (*OSL traps*) están ubicadas a mayor profundidad dentro de la sección transversal cristalina. No obstante, este tipo de trampas someras sí responden a un estímulo térmico así que, cuando se aplican los diferentes tratamientos térmicos en el SAR, muchas de estas cargas son transferidas hacia trampas OSL más profundas que, ahora sí, son sensibles a un estímulo lumínico, produciendo señal OSL, incrementando el número de cuentas registradas de forma artificiosa y dando lugar a una sobre-estimación de la *De* (Rhodes and Bailey, 1997).

Es por ello por lo que, en el propio protocolo SAR y para liberar estas cargas inestables atrapadas en trampas someras y que no sean transferidas a trampas OSL más profundas, se aplica un tratamiento térmico o *pre-heat* dentro del rango de temperaturas entre 180 y 300°C, previo al estímulo luminoso que generará la señal OSL. De esta manera se obtendrá una señal que procede únicamente de trampas profundas ionizadas durante el tiempo de enterramiento, correspondientes con las trampas OSL. Para optimizar la temperatura de estos tratamientos se realizan pruebas a modo de test como el “*pre-heat test*” en el que se analiza el comportamiento de la señal OSL en función de la temperatura. De forma complementaria, y sin ahondar demasiado en estos aspectos tan complejos y que se escapan al propósito del presente trabajo, estos tratamientos térmicos facilitan la redistribución de cargas activando los centros de recombinación de luminiscencia, aumentando la probabilidad de recombinación y de obtención de una señal OSL más optimizada (Wintle and Murray, 2006).

#### 3.4.3.2. Señal de normalización: *Test-dose*.

El *Test-dose*, como se comentó anteriormente, se ha desarrollado para obtener una señal de luminiscencia que pueda ser utilizada a modo de corrección o normalización de la señal OSL natural o regenerada de cada ciclo. La normalización tiene como finalidad prevenir los efectos derivados de las variaciones en la sensibilidad de luminiscencia de las alícuotas originadas por los tratamientos radiactivos artificiales y térmicos, ya que existe relación directa entre este tipo de variabilidad con la intensidad de la dosis inducida, así como con la temperatura aplicada en los distintos tratamientos térmicos, y que podrían derivar en una estimación poco fiable de la *De* (Rhodes, 2000; Murray and Wintle, 2000; Wintle, 2008). Es por ello por lo que se aplican dosis bajas y un tratamiento térmico menor en el *Test-dose*. No obstante, no resulta tan importante minimizar los cambios de sensibilidad de luminiscencia entre la señal regenerada (*Lx*) y la señal del *test-dose* correspondiente (*Tx*), sino que éstas sean constantes.

Este test está incluido en el propio protocolo SAR y se realiza en cada uno de los ciclos después de aplicar el estímulo luminoso y la medición de la señal OSL natural o regenerada ( $L_x$ ), siguiendo los mismos pasos (radiación beta, tratamiento térmico y estímulo-medición de señal de *Test-dose* ( $T_x$ )) pero con algunas diferencias. Por ejemplo, la radiación artificial beta es de igual intensidad o duración para todos los ciclos, siendo esta del orden de entre un 10 y 20% de la  $De$  (Murray and Wintle, 2000). Además, el tratamiento térmico o *cut-heat* es como un *pre-heat*, pero a una temperatura unos veinte grados menor –y su función sigue siendo la de eliminar cargas someras que, debido a la radiación emitida puedan ser transferidas a trampas OSL más profundas. El resto, el estímulo lumínico y lectura de la señal OSL, no varía (Wintle, 2008).

#### 3.4.3.3. Test de Recuperación y Reciclaje.

Como ya se ha comentado, el protocolo SAR incluye, además, dos ciclos a modo de test rutinarios e independientes entre sí. Estos son el test de recuperación y el test de reciclaje, que evalúan el efecto de los distintos tratamientos radiactivos, lumínicos y térmicos, propios del protocolo y que afectan al comportamiento de las muestras a efectos de luminiscencia. Fruto de ello son las variaciones en sensibilidad ya mencionadas o la transferencia de cargas de un tipo de trampas a otros.

La forma de evaluar qué alícuotas pasan los criterios de aceptación establecidos para estos test se basa en obtener las señales OSL necesarias a partir del SAR y aplicar la fórmula correspondiente a cada test (fórmulas 2 y 3 respectivamente; Wintle and Murray, 2006). Si en el primer ciclo se obtenía la señal natural corregida ( $L_N/T_N$ ), será en el penúltimo ciclo donde se obtenga la señal corregida para el test de recuperación ( $L_0/T_0$ ), y en el último la del reciclaje ( $L_x'/T_x'$ ).

$$(\%) \text{Recuperación} = \frac{(L_0/T_0)}{(L_n/T_n)} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Reciclaje} = \frac{(L_x/T_x)}{(L_{x'}/T_{x'})} \quad (3)$$

En el ciclo correspondiente al test de recuperación se mide la señal después de inducir a la alícuota a una dosis durante cero segundos (0Gy) para evaluar si existe algún tipo de recuperación de la señal- término acuñado por Aitken and Smith (1988)- es decir, si a lo largo de los distintos tratamientos radiactivos en cada uno de los ciclos se están produciendo transferencia de cargas desde trampas muy profundas (en este caso no se debe a la transferencia producida desde trampas someras) y que pueden generar una señal OSL en alícuotas que han sido completamente blanqueadas y sobre las que no se induce radiación alguna (Wintle and Murray, 2006). Así, el grado de recuperación se obtiene dividiendo el dato normalizado obtenido en este ciclo a dosis cero (0Gy) entre el dato normalizado de la señal natural (primer ciclo), aceptando aquellas alícuotas cuyo

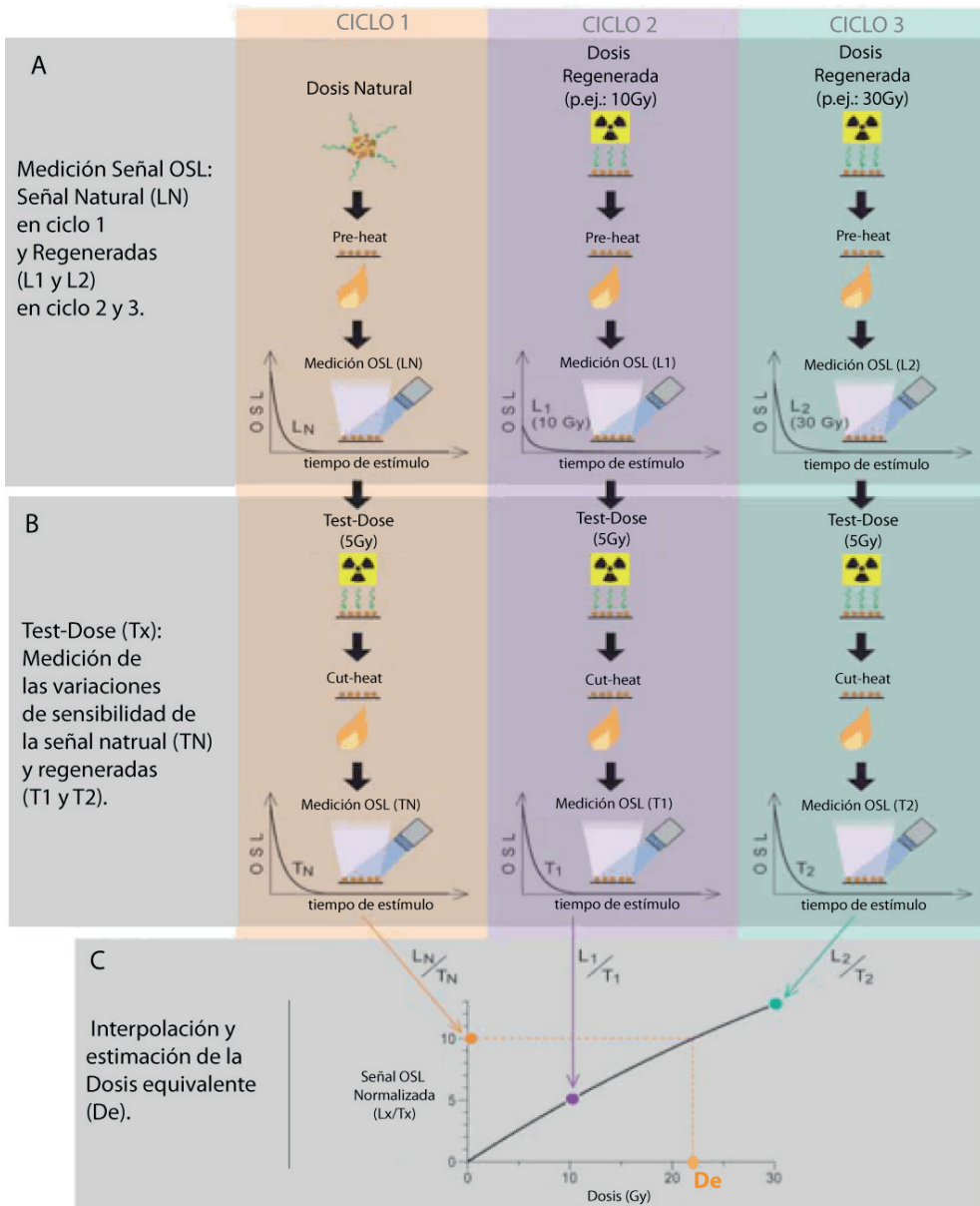
porcentaje sea menor 10%, y desechando el resto, ya que son susceptibles de presentar una señal OSL superior a la que verdaderamente le corresponde y que podría derivar en una sobre-estimación de los resultados. Con ello se está monitorizando el comportamiento de las alícuotas comparando la respuesta frente a la radiación natural y frente a los sucesivos ciclos de radiación artificial, así como la fiabilidad de la propia señal OSL.

Respecto al ciclo correspondiente al reciclaje de la señal o test "*Recycling point*" se repite una de las dosis aplicadas en el segundo o tercer ciclo (en el presente estudio 350 u 800s). Esto es debido a que las variaciones en la sensibilidad de luminiscencia son progresivas, incrementándose a medida que transcurren los ciclos y aumenta la dosis radiactiva inducida. Así, las diferencias entre el segundo y el último ciclo de evalúan la amplitud de estas variaciones (Wintle and Murray, 2006). Si el protocolo es capaz de corregirlas, el cociente entre la señal normalizada de la dosis repetida en el último ciclo ( $L_x/T_x$ ) y el de la obtenida en el segundo o tercer ciclo ( $L_x/T_x$ ) será aproximadamente la unidad, si bien, el criterio de aceptación estará dentro del rango [0.9 y 1.1], lo que significa que la estimación de la *De* empleando el SAR incluirá siempre un pequeño porcentaje de este error sistemático. Las alícuotas cuyo ratio se ubique fuera de estos límites se rechazan.

#### 3.4.3.4. Blanqueamiento de la señal OSL.

Un último aspecto, de importancia relevante y que cierra cada uno de los ciclos del protocolo SAR, es el proceso de blanqueamiento completo de la señal mediante estimulación óptica a alta temperatura, por ejemplo, empleando un diodo azul (LEDs) a 280°C, con el fin de liberar cualquier tipo de carga que pudiera permanecer atrapada después del estímulo lumínico y comenzar así el siguiente ciclo con las trampas OSL vacías y preparadas para albergar las cargas que serán redistribuidas al irradiar de forma artificial las mismas alícuotas en el siguiente ciclo.

En la siguiente figura (Fig. 3.9) se esquematiza de manera simplificada, la obtención de la señal OSL y de la señal normalizada ( $L_x/T_x$ ), correspondiente a los tres primeros ciclos llevados a cabo en un hipotético SAR, generando, a partir de ellas, la curva de crecimiento sobre la que se interpolará la señal OSL natural normalizada ( $L_N/T_N$ ).



**Figura 3.9.** Esquema de algunos ciclos y pasos del protocolo SAR: (A) Medición de la señal natural (LN) y regeneración y medición de las señales regeneradas (a 10 y 30Gy, por ejemplo) incluyendo el tratamiento térmico *pre-heat* antes del estímulo lumínico y lectura de la señal OSL; (B) Aplicación del *Test-dose* a dosis fija para cada ciclo (5Gy), incluyendo el tratamiento térmico *cut-heat*; (C) Estimación de la Dosis equivalente ( $De$ ) a partir de la interpolación de la señal natural normalizada ( $L_N/T_N$ ) en la curva de crecimiento creada a partir de las dosis regeneradas normalizadas en el ciclo 2 y ciclo3 ( $L_1/T_1$  y  $L_2/T_2$ ). No se incluye en la figura los ciclos correspondientes al test de regeneración y reciclaje de la señal OSL (figura modificada y extraída de Duller, 2008).



#### 3.4.4. *Dose-recovery* test.

El test *Dose-recovery* (Wallinga, 2000) es una aproximación independiente del protocolo SAR que se ha desarrollado para evaluar si la respuesta obtenida en el primer *test-dose* ( $T_N$ ), después de medir la señal natural ( $L_N$ ), refleja las variaciones de esta señal natural, ya que no son detectadas por los anteriores test, como el de recuperación. Para ello, el primer paso es blanquear las alícuotas empleadas para este test de forma similar a como ocurre en la naturaleza –esto se realiza empleando un estímulo luminoso (LEDs azul) que vacíe completamente las trampas OSL y a una temperatura de 125°C para eliminar aquellas cargas situadas en las trampas someras que puedan transferirse térmicamente a trampas OSL. Posteriormente se irradian las alícuotas con una dosis conocida y similar a la dosis natural o  $D_e$  para, finalmente, aplicar un SAR de manera que se obtenga una estimación de esta dosis y poder compararla con la dosis real inducida, evaluando así el propio protocolo.

Por tanto, en este test -que no está incluido en el SAR- se está simulando un proceso de blanqueamiento y radiación natural, por lo que el cociente (formula 4) entre esta dosis inducida de valore conocido ( $D_e$  esperada) y la dosis estimada en este *Dose-recovery* test ( $D_e$  estimada) analizará la idoneidad del protocolo SAR.

$$\text{Dose Recovery (ratio)} = \frac{\text{Dosis estimada (De)}}{\text{Dosis esperada (Dx)}} \quad (4)$$

Generalmente, para una alícuota dada, el ratio entre la  $D_e$  obtenida y la esperada dosis ( $D_x$ ) debe de ser aproximadamente la unidad, aceptándose una desviación del 10%, por lo que el criterio de aceptación se situará entre el rango delimitado por los valores 0.9 y 1.1 para poder asumir que mediante el protocolo SAR se puede obtener una estimación de la  $D_e$  fiable.

## 3.5. Bibliografía

- Aitken, M.J.; Fleming, S.J. (1971) Preliminary application of thermoluminescent dating to the eruptions of Thera. Acta of the 1st International Scientific Congress on the Volcano of Thera, 293-302.
- Aitken M.J. (1985) Thermoluminescence dating. Academic, London. 359pp.
- Aitken M.J. and Smith, B.W. (1988) Optical dating: recuperation after bleaching. Quaternary Science Reviews 7, 387-394.
- Aitken M.J. (1998) An Introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press. 267pp.
- Ballarini, M.; Wallinga, J.; Wintle, A.G.; Bos, A.J.J. (2007) A modified SAR protocol for optical dating of individual grains from young quartz samples. Radiation Measurements 42, 360-369.
- Banerjee, D.; Bøtter-Jensen, L.; Murray, A.S. (2000) Retrospective dosimetry: estimation of the dose to quartz using the single-aliquot regenerative-dose protocol. Applied Radiation and Isotopes 52, 831-844.
- Bailey, R.M.; Smith, B.W. and Rhodes, E.J. (1997) Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL. Radiation Measurements 27, 123-136.
- Bailey, R. M. & Arnold, L. J. (2006) Statistical modelling of single grain quartz De distributions and an assessment of procedures for estimating burial dose. Quaternary Science Reviews 25, 2475-2502.
- Bøtter-Jensen, L.; Agersnap Larsen, N.; Markey, B.G. and McKeever, S.W.S. (1997) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C as a sensitive OSL dosimeter for rapid assessment of environmental photon dose rates. Radiation Measurements 27, 295-298.
- Bøtter-Jensen, L.; McKeever, S.W.S.; Wintle, A.G. (2003) Optically Stimulated Luminescence Dosimetry. Elsevier Science B.V. Amsterdam. The Netherlands. 355pp.
- Burbidge, C.I., Duller, G.A.T., Roberts, H.M. (2006) De determination for young samples using the standardised OSL response of coarse-grain quartz. Radiation Measurements 41, 278-288.
- Cunningham, A. C. and Wallinga, J. (2010) Selection of integration-time intervals for quartz OSL decay curves, Quaternary Geochronology 5, 657-666.
- Daniels, F.; Boyd, C.A. and Saunders, D.F. (1953) Thermoluminescence as a research tool. Science 117, 343-349.
- De la Rue, W. and Müller, H.W. (1878, 1880, 1883) Experimental researches on the electric discharge with the chloride of silver battery. II. The discharge in exhausted tubes. Phil. Trans. 169: 155-233; 171: 65-114; 174: 477-515. 1883. For discharge in air, see 169: 55-118, 1878.
- Duller, G.A.; Bøtter-Jensen, L.; Murray, A.S. (2000) Optical dating of single sand-sized grains of quartz: sources of variability. Radiation Measurements 32, 453-457.
- Duller, G.A. (2008) Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating. Boreas 37, 589-612.
- Harvey, E.N. (1957) A history of luminescence. Memoirs of the American Philosophical Society 44, 1-351.
- Huntley, D. J.; Godfrey-Smith, D. I.; Thewalt, M. L. W. (1985) Optical dating of sediments. Nature 313, 105-107.
- Hütt, G.; Jaek, I. and Tchonka, J. (1988) Optical Dating: K-feldspars optical response stimulation spectra. Quaternary Science Reviews 7, 381-386.
- Jain, M.; Murray, A. S. & Bøtter-Jensen, L. (2003) Characterisation of blue-light stimulated luminescence components in different Quartz samples: implications for dose measurement. Radiation Measurements 37, 441-449.
- Murray, A.S.; Roberts, R.G. (1997) Determining the burial time of single grains of quartz using optically stimulated luminescence. Earth and Planetary Science Letters 152, 163-168.

- Murray, A.S. and Wintle, A.G. (1999) Isothermal decay of optically stimulated luminescence in quartz. *Radiation Measurements* 30, 119–125.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single- aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.
- Murray, A.S.; Olley, J.M. (2002) Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria* 21, 1–16.
- Preusser, F.; Degering, D.; Fuchs, M.; Hilgers, A.; Kadereit, N.; Klasen N.; Krbetschek, M.; Richter, D; Spencer J.Q.G. (2008) Luminescence dating: basics, methods and applications. *Quaternary Science Journal* 57, 95-149.
- Roberts, R.G., Spooner, N.A. and Questiaux D.G. (1994) Palaeodose underestimates caused by extended duration preheats in the optical dating of quartz. *Radiation Measurements* 23, 647-653.
- Roberts, R.G.; Galbraith, R.F.; Olley, J.M.; Yoshida, H.; Laslett, G.M. (1999) Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part II, results and implications. *Archaeometry* 41, 365–395.
- Rhodes, E.J. and Bailey, R.M. (1997) The effect of thermal transfer on the zeroing of the luminescence of quartz from recent glaciofluvial sediments. *Quaternary Science Reviews* 15, 1-8.
- Rhodes, E.J. (2000) Observations of thermal transfer OSL signals in glacial quartz. *Radiation Measurements* 35, 595–602.
- Singarayer, J.S. and Bailey, R.M. (2003) Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation. *Radiation Measurements* 37, 451–458.
- Singarayer, J.S. and Bailey, R.M. (2004) Component-resolved bleaching spectra of quartz optically stimulated luminescence: preliminary results and implications for dating. *Radiation Measurements* 38, 111–118
- Smith, B.W. and Rhodes, E.J. (1994) Charge movements in quartz and their relevance to optical dating. *Radiation Measurements* 23, 329-334.
- Wallinga, J.; Murray, A.; Wintle A. (2000) The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. *Radiation Measurements* 32, 529-533.
- Wilson, B. (1778) An accounts of experiments made at the Pantheon on the nature and use of conductors. 100pp. London.
- Wintle, A.G.; Murray, A.S. (1998) Towards the development of a preheat procedure for OSL dating of quartz. *Radiation Measurements* 29, 81-94.
- Wintle, A.G. and Murray, A.S. (2006) A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41, 369-391.
- Wintle, A.G. (2008) Luminescence dating: where it has been and where it is going. *Boreas* 37, 471-482.
- Zimmerman, J. (1971) Thermoluminescent dating using fine grains from pottery *Archaeometry* 13, 29-52.

Internet:

<http://www.nutech.dtu.dk>

## Capítulo 4.

Tasa de radiación natural ionizante o *Dose-Rate (DR)*.



4. Tasa de radiación natural ionizante o *Dose-Rate* (DR).

## 4.1. Introducción a la tasa de radiación ionizante (DR).

De forma natural, la materia que compone el medio está influenciada por la radiación ionizante producida por la desintegración de los distintos isótopos radiactivos presentes en el mismo, así como por la acción de los rayos cósmicos procedente del espacio exterior. Esta ionización de la materia puede provocar variaciones a escala atómica, sub-atómica y/o molecular, como por ejemplo una redistribución de cargas dentro de la propia red cristalina en materiales semiconductores como cuarzo o feldespato. Algunas de estas cargas, como se ya se ha comentado, permanecen atrapadas en zonas defectuosas dentro de la propia red (trampas), pudiendo ser liberadas al recibir un estímulo determinado, generándose así una señal de luminiscencia cuantificable a partir de la cual se puede obtener una estimación de la *De* y un rango de edad para el último proceso de enterramiento, dentro de unos límites. En base a este procedimiento, se establece que el intervalo de tiempo de enterramiento es menor que el intervalo de tiempo en el cual la radiación natural del medio ejerce su influencia, asumiéndose una tasa de radiación anual constante -salvo excepciones que se desarrollarán más adelante. Esta tasa anual o *Dose rate* (DR), incide sobre los materiales depositados incrementando la redistribución de cargas dentro de la red cristalina de los minerales hasta un límite de saturación (Aitken, 1985), como ya se ha comentado, a partir del cual no se producen más alteraciones aun siendo irradiados.

Por otra parte, para el cálculo de la edad según la ecuación  $Edad=De/DR$  (en unidades  $ka= Gy/Gy\ ka^{-1}$  siendo  $1ka=1000años$ ) es necesario estimar la dosis equivalente (*De*) y la tasa de radiación del medio por unidad de tiempo (DR). Así, uno de los métodos de estimación de la DR se basaría en el cálculo en detalle del poder de penetración de cada tipo de radiación y el coeficiente de absorción de energía de cada uno de los constituyentes de la muestra, tarea muy compleja y que se simplifica mediante una aproximación que asume una matriz infinita (*infinite matrix assumption*). En ella se establece que, para un medio homogéneo, en el que la radiación ionizante y el coeficiente de absorción no sufren variaciones, y para un determinado volumen de muestra con dimensiones superiores al rango de penetración de las distintas fuentes de radiación ionizante, la tasa de absorción por unidad de masa es equivalente a la tasa de emisión por unidad de masa (Aitken, 1985). Cualquier perturbación de estas premisas está incluyendo un error en la estimación de la edad, por ello adquiere relevancia la selección del lugar de muestreo a efectos de homogeneidad, así como el análisis de la radiactividad natural. Además, el equilibrio entre emisión/absorción -o la naturaleza de un posible desequilibrio, si hubiere- resulta un dato geoquímico de gran interés que herramientas como la espectrometría gamma permiten analizar al cuantificar la actividad de los isótopos radiactivos más relevantes.

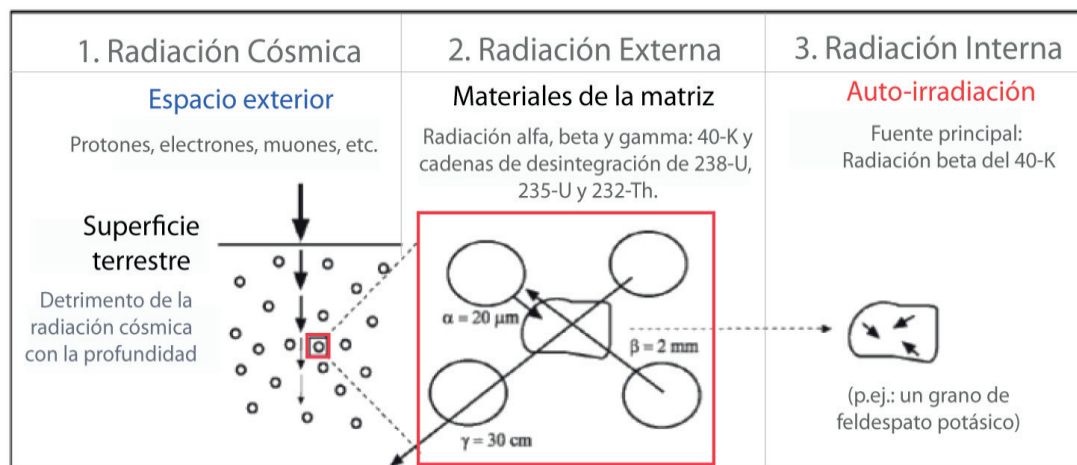
La estimación de la tasa de radiación ionizante total del medio ( $DR_{TOTAL}$ ) se calculará a partir de las estimaciones realizadas para cada fuente de radiación. Así, la señal natural de luminiscencia extraída para la estimación de la  $De$  dependerá de la  $DR$  y de la propia energía de esa radiación (generalmente de varios millones de electrón-voltio (eV) siendo  $1\text{MeV} = 10^6\text{eV} = 1.602 \cdot 10^{-13}\text{J}$ ), teniendo en cuenta diversos factores que afectan de manera específica a cada fuente, como homogeneidad del medio y micro-dosimetría, poder de penetración de las fuentes de radiación y tamaño de grano, atenuación de la radiación y contenido en agua en el sedimento, así como su profundidad o grado de compactación, y para las cuales se aplican factores determinados de corrección. Todos estos aspectos se irán desarrollando en los siguientes apartados.

#### 4.2. Fuentes de Radiación.

La radiación ionizante, como ya se comentó, procede de la desintegración de isótopos inestables presentes en el medio así como de la radiación cósmica. La primera fuente, la desintegración de isótopos, es un fenómeno que está muy influido por la litología de los materiales de partida en cuanto a su composición y abundancia en radio-isótopos, y viene acompañada de energía ionizante procedente de las partículas alfa o beta, entre otras, así como de ondas electromagnéticas gamma, cada una con su grado de penetración característico (Fig.4.1).

Concretamente, los isótopos radiactivos generados a lo largo de las series de desintegración de uranio y torio emiten partículas alfa, beta y radiación gamma. Otros isótopos inestables, como el potasio-40, emite partículas beta y radiación gamma, y el rubidio-87, emite partículas beta. Así, por ejemplo, mediante espectrometría gamma de alta resolución, se puede cuantificar y estimar la energía o actividad liberada por esta radiación ionizante, para un material dado, así como detectar perturbaciones en desarrollo normal de estos procesos como pudiera ser el desequilibrio en las tasas de desintegración entre los distintos radioisótopos de las series de desintegración mencionadas. Por otra parte, la estimación de la radiación cósmica se realiza mediante cálculos que tienen en cuenta la ubicación terrestre, altura y profundidad, en base a la metodología propuesta por Prescott y Hutton (1994).

Por tanto y simplificando, la tasa de radiación final ( $DR_{TOTAL}$ ) se obtendría como un sumatorio de las estimaciones de cada una de sus componentes, siendo estas la radiación gamma, beta, alfa y radiación cósmica, mediante la expresión  $DR_{TOTAL} = DR_{GAMMA} + DR_{BETA} + DR_{ALFA} + DR_{CÓSMICA}$ .

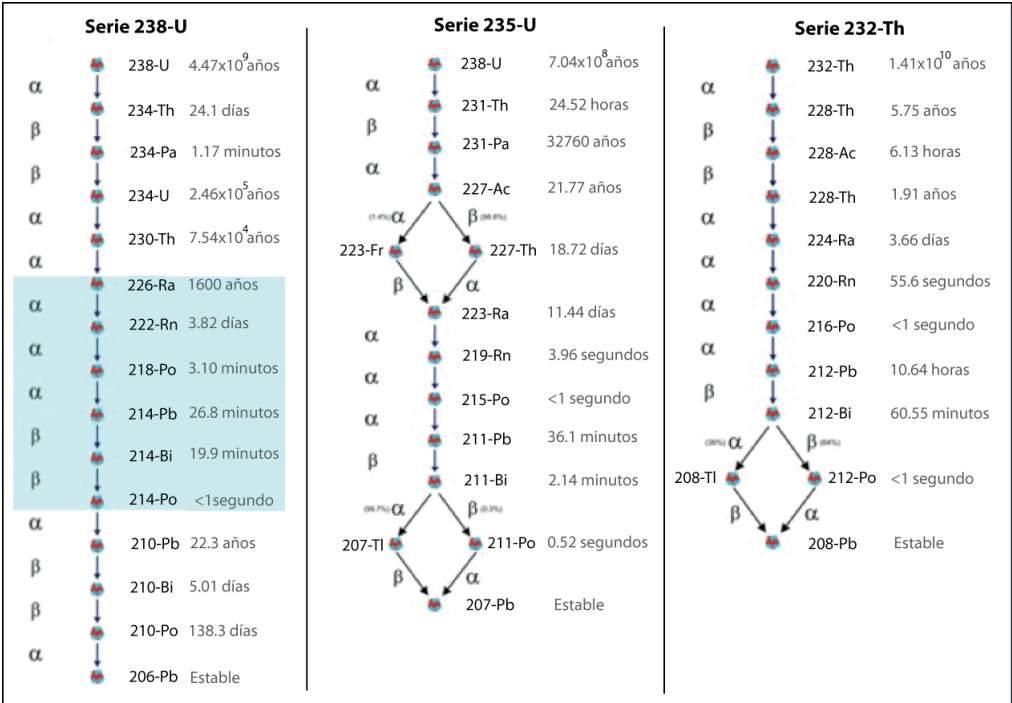


**Figura 4.1. Tipos de Radiación ionizante:** (1) Radiación cósmica del espacio exterior y su atenuación en profundidad; (2) Radiación externa de los materiales dispuestos en la matriz (granos minerales en el sedimento), incluyendo el poder de penetración de cada uno de los tipos de radiación (partículas alfa: 20 micras; partículas beta: 2 milímetros; radiación electromagnética gamma: 30 milímetros); (3) Auto-irradiación de los propios granos, generalmente debido a su contenido en Potasio (40-K). (Modificado y tomado de Aitken, 1985).

#### 4.2.1- Cadenas de desintegración radiactiva.

El material de partida, y por extensión aquellos materiales heredados que conforman los sedimentos, pueden presentar proporciones variables de elementos inestables que de manera natural emiten radiación ionizante al pasar a una configuración más estable. Este tipo de radiación que incide sobre el propio medio procede, principalmente, de las cadenas de desintegración de uranio ( $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ ) y torio ( $^{232}\text{Th}$  y  $^{230}\text{Th}$ ) en las que están involucrados un número variable de elementos inestables (Fig. 4.2), sucediéndose hasta llegar a un último elemento de configuración estable y asumiéndose un equilibrio a lo largo del tiempo entre la desintegración y acumulación de cada uno de los elementos que se suceden en la serie o cadena, premisa denominada “equilibrio secular”. Este equilibrio radiactivo puede, sin embargo, verse afectado por factores desencadenantes de desequilibrio, como por ejemplo acumulación o lavado, motivo por el cual se cuantifica la proporción de cada elemento en el propio medio en el que se toma la muestra, existiendo, además, otros factores como contenido en agua durante el tiempo de enterramiento, variaciones en la micro-dosimetría, auto-irradiación, etcétera, que influyen considerablemente en los cálculos de las estimaciones (Aitken, 1998).





**Figura 4.2.** Cadenas de desintegración de los isótopos radiactivos de 238-U (izquierda; en azul se muestran los grupos de equilibrio a partir del 226-Ra y 210-Pb tomados en cuenta en el presente trabajo), 235-U (centro) y 232-Th (derecha), incluyendo cada uno de los isótopos hijo formados, el tiempo de vida media correspondiente y la partícula radiactiva emitida (Bourdon et al., 2006).

Otros radioisótopos que emiten radiación son el potasio-40 ( $^{40}\text{K}$ ) que se desintegra como un único elemento dando lugar a argón-40 ( $^{40}\text{Ar}$ ) y una emisión gamma, y a calcio-40 ( $^{40}\text{Ca}$ ) con una emisión beta, o el rubidio-87 ( $^{87}\text{Rb}$ ) que se desintegra en estroncio-87 ( $^{87}\text{Sr}$ ) con una emisión beta.

4.2.1.1. Desintegración radiactiva e isótopos inestables

La desintegración radiactiva, fenómeno que viene acompañado por emisión de radiación ionizante en forma de energía o de partículas, se define como un proceso estadístico basado en ratios de desintegración y proporción de isótopos en el tiempo. Así, una proporción de isótopo inestable, llamado isótopo *padre*, pasa a generar en un determinado tiempo otra proporción de isótopo *hijo*, que puede ser estable o inestable - frecuentemente se hace referencia como *padre* al isótopo que se desintegra e *hijo* al que se produce. Si éste isótopo hijo es estable, en el transcurso de un tiempo característico todo el isótopo padre se agotará y pasando toda su proporción inicial a isótopo hijo, deteniéndose ahí el proceso. Si por el contrario, el isótopo hijo también es inestable -y así sucesivamente- se generan series o cadenas de desintegración que culminarán con la presencia de algún elemento o isótopo hijo estable.

La desintegración en el tiempo que experimenta un isótopo inestable sigue una función exponencial que decrece de manera constante. Esto implica que la tasa de acumulación del isótopo estable, y último de la serie, irá disminuyendo paulatinamente al agotarse exponencialmente la desintegración de los radioisótopos inestables precedentes. Por otro lado, el tiempo necesario para que la mitad de los núcleos de isótopo padre se desintegren dando lugar a núcleos del isótopo hijo correspondiente se denomina vida media (*half-life*), por lo que la proporción de átomos de isótopos hijo intermedios que hay presentes en una cadena de desintegración en un momento concreto está en función de sus vidas medias correspondientes. La proporción estimada de isótopos padre e hijos en una cadena a lo largo del tiempo guarda relación con el concepto de equilibrio. Así, en términos de promedio, se dice que la serie está en equilibrio radiactivo cuando para cada uno de los átomos padre en desintegración también se desintegra un átomo de cada uno de los isótopos hijos intermedios de esa serie (Ivanovich and Harmon, 1982). Como la tasa de desintegración de un determinado isótopo inestable es proporcional a la cantidad átomos del mismo que están presentes en un tiempo ( $t$ ) y como para cada elemento existe una constante de desintegración ( $\lambda$ ) que viene determinada por la probabilidad de desintegración en un intervalo de tiempo en términos de vida media ( $t_{1/2}$ ), mediante la expresión  $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$  o  $\lambda = 0.693 / t_{1/2}$ , la presencia de desequilibrio en las cadenas podría determinarse comparando la tasa de desintegración de isótopos padre con acumulación o proporción obtenida de isótopo hijo.

#### 4.2.1.2. Equilibrio Secular.

Para el cálculo de la DR es fundamental determinar si ésta ha sufrido variaciones en el tiempo y si las series de desintegración de uranio y torio se mantienen en equilibrio secular. Este equilibrio viene condicionado por el hecho de que la vida media del isótopo padre es mucho mayor que la de cada uno de los isótopos hijo de la cadena, lo que implica que la emisión de radiación ionizante del isótopo padre no debería decrecer de manera drástica a lo largo de las vidas medias de sus isótopos hijo (Olley et al., 1996; Ivanovich and Harmon, 1982). Bajo la premisa de equilibrio secular, se desarrolla la ecuación de Bateman (1910) que muestra la siguiente igualdad  $N_2 \lambda_2 = N_1 \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 t})$ , en donde ( $N_1$ ) y ( $N_2$ ) son el número de átomos radiactivos de isótopo hijo y padre respectivamente, con sus constantes de desintegración ( $\lambda$ ) correspondientes y en un tiempo ( $t$ ) transcurrido. Así, para tiempos muy prolongados, donde la vida media del isótopo padre es mucho mayor que la del isótopo hijo (por ejemplo el  $^{238}\text{U}$  con una duración de  $4,5 \cdot 10^9$  años), se obtiene la igualdad  $N_2 \lambda_2 = N_1 \lambda_1$  que caracteriza al equilibrio secular. Como la emisión de radiación ionizante de los isótopos hijo viene precedida por la propia emisión de los isótopos padre, las proporciones quedarían equilibradas determinándose este equilibrio secular mediante la expresión  $N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3 \dots = N_i \lambda_i$ .

Por otra parte, para cuantificar la proporción de un isótopo se emplea el término actividad o tasa de actividad, que hace referencia al número de átomos multiplicado por su constante de desintegración ( $Actividad=N\cdot\lambda$ ) y se obtiene analíticamente mediante espectrometría gamma –la unidad de actividad específica suelen ser *Bequerelios* ( $1Bq=1decay/sec$ ) o *Curies* ( $1Ci=37\cdot109Bq$ ), pero para la actividad por unidad de masa se emplea  $Bq\cdot kg^{-1}$ . Así, para una serie de desintegración en equilibrio, la actividad será igual para todos sus miembros independientemente de la diferencia que exista en la duración de sus respectivas vidas medias. Por ejemplo, para el  $^{238}U$  la actividad de cada elemento de la serie en equilibrio vendría dada por la igualdad  $^{238}U=^{234}U=^{230}Th=^{226}Ra=^{210}Pb$ .

Algunas aproximaciones estiman el equilibrio a partir de la actividad de los radioisótopos estableciendo las igualdades de los radioisótopos  $^{238}U=^{234}U=^{230}Th=^{226}Ra$  para la serie de  $^{238}U$  y de los radioisótopos  $^{232}Th=^{228}Ra=^{228}Th=^{208}Pb$  para la serie de  $^{232}Th$  (Olley, 1996). No obstante, el espectro gamma de laboratorio no mide la concentración de todos los radioisótopos, por lo que los propios laboratorios realizan las distintas estimaciones empleando grupos de equilibrio basados en la sub-división de las series de desintegración asumiendo equilibrio secular, bien para estimar la actividad de cada serie y con ello la *DR*, o bien para estimar la actividad de algunos de estos radio-isótopos de la serie que no se pueden medir (Oczkowski, 2000). Estos grupos de equilibrio establecidos son grupo (I): Serie torio (completa):  $^{228}Ac$ ,  $^{212}Pb$ ,  $^{212}Bi$ ,  $^{208}Tl$ ; grupo (II): Pre-thoron ( $^{228}Ac$ ); grupo (III): Pre-radón de la serie de  $^{238}U$  ( $^{234}Th$ ,  $^{234}Pa_{(m)}$ ,  $^{226}Ra$ ); grupo (IV):  $^{222}Rn$  y resto de serie ( $^{214}Pb$ ,  $^{214}Bi$ ,  $^{210}Pb$ ); grupo (V): Serie Uranio-235 completa ( $^{235}U$ ,  $^{223}Ra$ ); grupo (VI)  $^{40}K$  y  $^{87}Rb$ .

Así, promediando la actividad de cada grupo se puede estimar la actividad de toda la serie desintegración o la actividad de alguno de los isótopos respecto a la de sus padres al considerar equilibrio entre ellos. Además, a partir de la actividad del  $^{40}K$  se puede estimar la del  $^{87}Rb$  en base a proporciones estándar, ya que el ratio  $^{87}Rb/^{40}K$  se establece en valores de 0.142 aproximadamente (Warren, 1978).

#### 4.2.1.2.1. Factores desencadenantes de desequilibrio radiactivo.

La movilización de un elemento puede generar variaciones en la proporción inicial del mismo produciéndose una pérdida o enriquecimiento de alguno de los isótopos de las series de desintegración a lo largo de su vida media que podrían dar lugar a desequilibrios, influyendo así en la estimación de la tasa de radiación (*DR*) (Krbetschek et al., 1996). Las causas de desequilibrio (Olley et al., 1996) están relacionadas con fenómenos de disolución y/o precipitación debido a las diferentes propiedades químicas de cada uno de los elementos de la serie correspondiente, o la difusión gaseosa como el caso del radón. Así, aspectos como meteorización, erosión, transporte, clasificación, textura, estructura, porosidad, entre otros, pueden afectar de modo considerable a los elementos que conforman los materiales de partida o los propios medios sedimentarios en

función de su movilidad o persistencia, por lo que resulta indispensable el análisis de la actividad dentro de las series de desintegración para detectar posibles variaciones en las proporciones originales de isótopos.

Aunque la probabilidad de desequilibrio es muy variable para cada isótopo y este pueda darse en casi cualquier elemento de las series de desintegración, afecta en mayor grado al manifestarse al principio estas, en donde se ubican aquellos radioisótopos de mayor vida media, pudiendo llegar a persistir durante milenios (Murray et al., 1991). Por otra parte, para la serie de torio la probabilidad de desequilibrio es más baja debido a la menor duración de las vidas medias de sus isótopos hijo y a las propias características de cada uno de los radioisótopos de la cadena, considerándose improbable para sedimentos de edad superior a 20ka. No obstante, para las series de uranio, las vidas medias son mayores y los elementos como el propio uranio o el radio presentan mayor solubilidad y probabilidad de arrastre por agua y/o materia orgánica en suspensión.

Uno de los isótopos al que se le ha ofrecido especial atención a efectos de desequilibrio es el radón (Rn) debido a su naturaleza gaseosa y difusión por los poros del medio. Este isótopo está en la mitad de cada una de las series de U y Th, aunque hay mayor probabilidad de difusión para el  $^{222}\text{Rn}$  de la serie de  $^{238}\text{U}$  debido a que su vida media es de 3.8 días frente los 4 y 55 segundos de vida media del  $^{219}\text{Rn}$  y  $^{220}\text{Rn}$  del resto de series, con menos tiempo de difusión y más probabilidad de desintegración dentro del propio medio. (Aitken, 1985; Olley, 1996).

Otros aspectos que pueden influir en el equilibrio es la precipitación del  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico y/o formación de complejos organo-metálicos, así como fenómenos de retroceso de partículas alfa (*alpha particle recoil*) que hace referencia al comportamiento de las partículas alfa que, a modo de ejemplo, implica una unión más débil del Uranio-234 a la red cristalina aumentando la probabilidad de disolución, su inclusión en el sistema poroso del sedimento o su incorporación a complejos orgánicos hidrosolubles, si bien, la precipitación de este radioisótopo tiene mayor notoriedad a partir de la era industrial (s.XX) (Sanjurjo-Sánchez, 2016 – comunicación personal). Respecto al potasio-40 ( $^{40}\text{K}$ ), con una vida media de  $1.3 \cdot 10^9$  años, aproximadamente, y desintegrándose dando lugar a dos isótopos estables (argón-40 y calcio-40), presenta la problemática asociada al fenómeno de auto-irradiación o emisión de radiación interna que se produce en los propios granos de feldespato potásico que pueden ser empleados como dosímetros, aspecto que se comentará en el apartado correspondiente a estos minerales y la señal IRSL (ver apartado 6.5.).

Así, debido a la variabilidad de las vidas medias y la dinámica de los sistemas sedimentarios, solo es posible estimar desequilibrio en base modelos teóricos, más o menos ajustados en función de la escala de tiempo o edad de estudio, a lo que habría que incluir que, partiendo de una condición de desequilibrio, si el depósito actúa como un sistema cerrado, se pueda producir un re-equilibrio, lo que supondría una infra-estimación de la DR que, por otra parte, raramente incluye un error superior al 3%. Es por ello que, de forma usual, se asume equilibrio secular (Murray, 1992; Wintle y Huntley, 1979; 1980).

#### 4.2.1.3. Otras fuentes de variación de la $DR$ .

Existen otras fuentes de variación que pueden afectar en la estimación de la  $DR_{TOTAL}$  y principalmente a sus componentes beta ( $DR_{BETA}$ ) y alfa ( $DR_{ALFA}$ ), y que guardan relación con la heterogeneidad en la distribución de radioisótopos en el propio sedimento. También influyen aspectos como el tamaño de grano (de cuarzo o feldespato) y grado de penetración de las partículas ionizantes, así como el grado de atenuación de la radiación debido al contenido de agua intersticial en el medio.

##### 4.2.1.3.1 Radiación beta: microdosimetría y heterogeneidad en el sedimento y factores de atenuación en granos de cuarzo.

La heterogeneidad en la micro-dosimetría del sedimento hace referencia a la cantidad de radiación beta que recibe cada uno de los granos de cuarzo dentro del espacio que ocupa el material a datar, siendo atribuida a una distribución heterogénea de los radioisótopos, e influyendo otros aspectos como composición o densidad del medio sedimentario (Murray and Roberts, 1997; Nathan et al., 2003). Tiene como consecuencia un aumento de la incertidumbre en la estimación de la componente beta ( $DR_{BETA}$ ) y por tanto, de la tasa de radiación natural ( $DR_{TOTAL}$ ) y del error final.

La causa principal se debe a una distribución irregular (no-uniforme) en el contenido de  $^{40}K$  incluido en los granos de feldespato potásico y las fluctuaciones en la distribución espacial de las partículas beta procedentes de este radioisótopo, cuyas emisiones se denominan puntos calientes beta (*hot-spots*). No obstante, la probabilidad de no recibir radiación ionizante de estos puntos calientes es prácticamente nula -incluso a bajas concentraciones de potasio- afectando, por tanto, a una escala espacial del rango de la penetración de las partículas beta, de 3mm aproximadamente. Bajo la premisa de "*infinite large sphere*" (Murray, 1981) se asume una radiación uniforme y homogénea dentro de una esfera ideal de cuarzo de 30cm de diámetro -rango máximo de penetración gamma. Esta es la razón por la que en los muestreos se seleccionan zonas homogéneas en el sedimento con el fin de evitar cualquier incremento en la incertidumbre de la  $DR$  (Aitken, 1985). Otra manera de reducir significativamente el efecto de la heterogeneidad beta es empleando alícuotas multi-grano ya que la distribución converge hacia un valor promedio (Nathan et al., 2003). Para ello, en el laboratorio de luminiscencia se puede analizar la señal emitida por una cantidad determinada de granos por alícuota y seleccionar aquella que se ajusta a una distribución normal, más homogénea, comparando, por ejemplo, alícuotas de distinto tamaño, esto es, conformadas por un número variable de granos de mineral, por ejemplo, de 10, 30, 100, 500 y 1000 granos.

La evaluación de la tasa de absorción y de los factores de atenuación de la componente beta para granos de cuarzo esféricos y embebidos en una matriz homogénea y uniforme, fue llevada a cabo por Mejdahl (1979) y

posteriormente por Bell (1979)- este último incluyó la eliminación de la capa superficial (unas  $9\mu\text{m}$ ) de los granos de cuarzo tratados con fluorhídrico para eliminar la radiación alfa (HF-*etching*) (Fleming, 1979). No obstante, estos factores de atenuación han sido actualizados mediante modelos de simulación de procesos estocásticos de emisión de electrones y fotones en cascada llevada a cabo por Brennan (2003), y asumiendo, como se comentó anteriormente, un sedimento uniforme a modo de esfera homogénea de 30cm de diámetro (*"infinite large sphere assumption"*; apartado 4.1.). En ellos se relaciona la variación de la absorción en función de la densidad del material -que para el cuarzo es de  $2.65\text{ g/cm}^3$ - y la distancia referida al diámetro del grano de cuarzo, para las series de U, Th y K, con y sin tratamiento con HF. Estos complejos modelos teóricos basan sus estimaciones en variables como la distancia a una fuente beta de energía inicial en un medio uniforme de densidad dada y la auto-irradiación con una fuente interna uniforme de radiación beta en la propia muestra para un grano esférico de radio " $r$ ", en donde el factor de absorción ( $\phi$ ) es la fracción de dosis beta absorbida por el propio grano. También se incluye el efecto del ataque ácido con HF o la estimación de un factor de atenuación ( $1-\phi$ ) equivalente a la fracción de radiación beta emitida por una matriz homogénea con distribución uniforme que absorbe un grano, válido para tratamiento con HF. Este último aspecto es el más relevante a efectos de estimación de la dosis beta ( $DR_{\text{BETA}}$ ) en el que se establece un factor de atenuación por tratamiento con HF en torno a 0,9 y en función del tamaño de grano (Aitken 1985; Brennan (2003). En estos resultados quedan incluidas, además, las posibles variaciones en las premisas de uniformidad de radiación beta en la matriz y esfericidad de los granos.

#### 4.2.1.3.2. Radiación alfa.

La radiación alfa ( $DR_{\text{ALFA}}$ ), de alta energía y poco poder de penetración (entre 20 y  $30\mu\text{m}$ ), conlleva la problemática derivada de su menor eficiencia para datación por luminiscencia al generar una señal muy débil, que generalmente se elimina con un tratamiento con fluorhídrico (Fleming, 1979; Valladas and Valladas, 1982). Además, presenta fenómenos de atenuación en función del tamaño de grano, aspectos abordados por distintos investigadores: Bell (1980) obtiene unos valores de atenuación basados en las estimaciones del total de energía depositada por las partículas alfa en su recorrido y Brennan (1991) actualiza los datos ya que la señal que generan las partículas alfa no es proporcional a la energía depositada sobre la muestra sino a la longitud de su propio recorrido (a su penetración), incrementándose los valores de atenuación para cada tamaño de grano. Posteriormente Brennan (2006) estudia la atenuación de radiación alfa en función de la heterogeneidad del medio e incluye la atenuación provocada por el contenido en agua del propio medio. No obstante, los coeficientes que se vienen aplicando proceden del trabajo de Rees-Jones (1995) -debido a la complejidad que deriva de los cálculos propuestos por Zimmerman (1971) y Aitken (1985) para obtener el valor- $k$  y valor- $a$ , respectivamente, y estimar así la dosis alfa efectiva (dicha complejidad se asocia, por ejemplo, con aspectos relacionados con la estimación de la dosis efectiva alfa en función de la dosis beta, la calibración de las fuentes radiactivas empleadas, así como con el grado de penetración de las partículas, las

variaciones en la sensibilidad y número de trampas en función de la energía de cada radiación aplicada, etc.).

Además, aunque para la fracción gruesa ( $>100\mu\text{m}$ ) la radiación alfa externa es eliminada mediante la aplicación de tratamiento químico con fluorhídrico (HF-*etching*) (Fleming, 1979; Aitken, 1985), para la fracción fina poli-mineral ( $<63\mu\text{m}$ ) dicha componente alfa no se elimina. En este caso, el valor- $a$  se estima en  $0.08 \pm 0.002$  (Brennan, 2003). No obstante, la incertidumbre incluida en la edad final debido a ligeras variaciones de estos coeficientes, para cada estudio, tiene una contribución muy reducida, suponiendo un error en las estimaciones finales que no supera el 2%.

#### 4.2.1.3.3. Contenido en agua y su efecto en la DR.

El agua presente en el sedimento absorbe una gran cantidad de radiación ionizante debido a su mayor coeficiente de absorción –comparado, por ejemplo, con el aire– disminuyendo así la dosis radiactiva que finalmente incide sobre la red cristalina de los minerales. Como resulta obvio, en ambientes áridos el sedimento permanecerá completamente seco y en ambientes sumergidos saturado en agua. No obstante, aunque se pueda calcular porcentaje de saturación y humedad en el laboratorio, indicando la proporción máxima de agua que puede albergar el sedimento y el contenido en agua en el momento de muestreo, respectivamente, la estimación de la cantidad de agua durante el tiempo de enterramiento resulta algo más compleja debido, por ejemplo, a las variaciones en el régimen de precipitaciones o condiciones de drenaje que pudieran acontecer. Es por ello por lo que, asumiendo unas condiciones constantes en el medio, se puede realizar una aproximación para esta tasa de atenuación por contenido en agua del sedimento, cuya aportación al error final es menor al 5% (Aitken, 98).

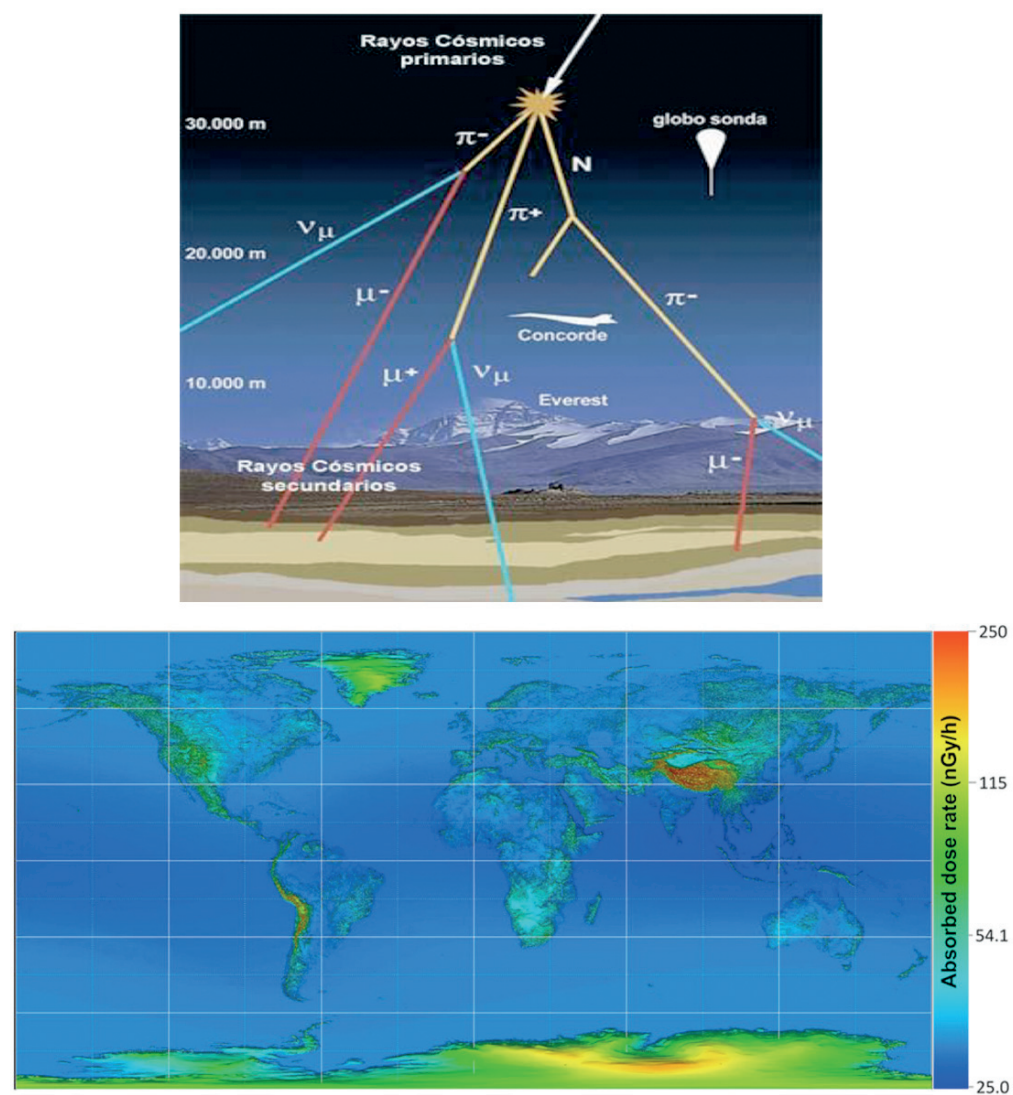
La atenuación de la tasa de radiación natural anual por contenido en agua de la matriz ( $DR_w$ ) responde matemáticamente a la expresión  $DR_w = DR / (1 + (xWF))$  (Zimmerman, 1971; Aitken, 1985), siendo ( $DR$ ) la dosis anual en seco, ( $W$ ) la saturación o el contenido en agua expresado como masa saturada entre masa seca, ( $F$ ) es la fracción de saturación correspondiente al contenido promedio en agua estimado durante la edad de enterramiento (fracción del espacio poroso ocupado por agua a lo largo de este tiempo) y ( $x$ ) el factor de corrección por atenuación debida al agua, estimado en  $x=1.14$  para radiación gamma y en  $x=1.25$  para la radiación beta. Así, se establecen las expresiones  $D_{W\beta} = D_{\beta} / (1 + (1.25WF))$  y  $D_{W\gamma} = D_{\gamma} / (1 + (1.14WF))$  para cada una de las componentes beta y gamma respectivamente. La expresión para radiación alfa es  $D_{W\alpha} = D_{\alpha} / (1 + (1.50WF))$ , pero no se aplica para grano grueso de cuarzo y queda incluida en la propia estimación del “valor- $a$ ” para grano fino poli-mineral.

Estos valores han ido modificándose mediante estimaciones teóricas, incluyendo en el modelo parámetros físicos que afectan a la cantidad de energía absorbida como sección transversal de los minerales empleados, porosidad o poder de penetración de las partículas, comparando medios secos y húmedos y poniendo de manifiesto la importancia del tamaño y geometría del grano empleado como dosímetro. Los resultados son coincidentes con modelos y simulaciones idealizadas: la atenuación de la radiación gamma por efecto del agua se incrementa de manera directamente proporcional a la energía ionizante recibida e inversamente al tamaño de grano para cada una de los isótopos principales. Se establece así un factor de atenuación de radiación beta de  $x=1.14$  para granos de tamaño  $\geq 100\mu\text{m}$  y de  $x=1.19$  para tamaños menores (Guérin y Mercier, 2012) teniendo en cuenta, además, la presencia de carbonatos u otros precipitados en el espacio poroso que pudieran afectar a la tasa de radiación natural (Nathan y Mauz, 2008).

#### 4.3. Radiación Cósmica

La contribución de la radiación cósmica supone un bajo porcentaje de la radiación natural ionizante en el medio sedimentario, pero no por ello insignificante. Este tipo de radiación ionizante está compuesta por electrones de baja penetración, neutrones en superficie y muones en profundidad, entre otros, y cuya intensidad radiactiva disminuye de forma considerable al profundizar una distancia de medio metro -así como la energía procedente de muones, más penetrantes. El total de la radiación que alcanza la superficie terrestre es la resultante de la atenuación que genera tanto el campo magnético como la atmósfera terrestre, por lo que la radiación se incrementa un 7% entre latitudes desde 0 hasta 40°, manteniéndose constante a partir de ese límite (Prescott and Stephan, 1982) (Fig.4.3). También aumenta con la elevación al disminuir el grosor de la atmósfera.





**Figura 4.3.** (Arriba) Rayos cósmicos primarios y secundarios. (Abajo) Mapa mundial de la DR (nGy/h) absorbida a nivel del suelo o nivel del mar debido a la radiación cósmica (Sato, 2016). (<https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/>).

El cálculo de la dosis cósmica ( $DR_{\text{CÓSMICA}}$ ) se estima en función de (i) la profundidad, (ii) la latitud geomagnética, (iii) la altitud y (iv) la aplicación de las correcciones pertinentes originadas por las variaciones a largo plazo que experimenta el campo magnético, desarrollándose las siguientes expresiones:

(i) Obtención de la dosis cósmica a partir de la expresión  $D_0 = 0.21^{(0.07x+0.005x^2)}$  en (Gy/ka) siendo ( $D_0$ ) la dosis cósmica incidente a nivel del mar con valores para materiales estándar a profundidad ( $x$ ) expresada en hg/cm<sup>2</sup> o 100g/cm<sup>2</sup>, en donde 60cm corresponderían a 1.5hg/cm<sup>2</sup> (Prescott and Hutton, 1994), con una incertidumbre que no supera el 5%.

(ii) Conversión de la latitud geográfica ( $\theta$ ) y longitud ( $\phi$ ) a latitud geomagnética ( $\lambda$ ) a partir de la expresión  $\sin(\lambda) = 0.203 \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi - 291) + 0.979 \cdot \sin(\theta)$ , con valores positivos para latitud Norte y longitud Oeste, también disponible en tablas (McNish, 1936).

(iii) Contribución de la dosis cósmica ( $DR_{\text{CÓSMICA}}$ ) a la tasa de radiación anual del medio total ( $DR_{\text{TOTAL}}$ ) en función de la latitud geomagnética y la altitud mediante la expresión  $DR_{\text{CÓSMICA}} = D_0 \cdot \left[ F + J^{(h/H)} \right]$ , ya obtenido ( $D_0$ ) y donde los parámetros  $F$ ,  $J$  y  $H$ , varían en función de la latitud geomagnética disponibles en tablas (Prescott and Hutton, 1994), siendo ( $h$ ) la altura respecto al nivel del mar actual.

(iv) Para posibles correcciones se emplean factores de corrección tabuladas respecto a la latitud geomagnética y altitud, debido a la variación a largo plazo del campo magnético (Prescott and Hutton, 1994).

#### 4.4 Determinación de la tasa de radiación natural del medio y factores de conversión.

El cálculo final de la tasa de radiación natural ( $DR_{\text{TOTAL}}$ ) se estimará como el sumatorio de cada una de las componentes, aplicando los factores de conversión y de atenuación correspondientes así como las correcciones pertinentes a efectos de humedad, altitud, etcétera, y en función de la fracción granulométrica seleccionada, todo ello bajo la expresión  $DR_{\text{TOTAL}} = (DR_{\text{ALFA}} + DR_{\text{BETA}} + DR_{\text{GAMMA}} + DR_{\text{CÓSMICA}})$ .

Bajo la premisa de un medio homogéneo y en equilibrio secular, se establecen unos factores de conversión para definir las medidas obtenidas para actividad o concentración de isótopos en términos de tasa de radiación natural ionizante. Estos factores dependen de las propiedades de los isótopos involucrados en cada serie y se calculan a partir de datos nucleares de la *ENSDF* (*Evaluated Nuclear Structure Data File*-[www.nndc.bnl.gov](http://www.nndc.bnl.gov)) teniendo en cuenta su vida media u otros parámetros como la tasa de bifurcación (*branching ratios*), intensidad o energía de partículas alfa, beta y emisiones gamma, tanto para cada una de las transiciones individuales de los elementos inestables de las series de <sup>238</sup>U y <sup>232</sup>Th (la abundancia de <sup>235</sup>U natural es del 0.72% por lo que, salvo excepciones, no se incluye en las estimaciones), como para el <sup>40</sup>K y <sup>87</sup>Rb, (Adamiec y Aitken, 1998; Guérin et al., 2011; Liritzis et al., 2013).

Aunque los primeros factores de conversión empleados fueron los de Adamiec y Aitken (1998), en la actualidad se emplean aquellos estimados por Guérin (2011), si bien, en el trabajo de Liritzis (2013) se incluye el error asociado a partir de la incertidumbre individual en cada uno de los parámetros estimados y utilizando las fórmulas básicas establecidas para aplicar la ley de propagación del error, teniendo en cuenta que la contribución de éste error se puede considerar como marginal comparado con otros tipos de incertidumbre para la estimación de la edad.

## 4.5. Bibliografía.

- Adamiec, B.; Aitken, M.J. (1998) Dose-rate conversion factors: an update. *Ancient TL* 16, 37-50.
- Aitken M.J. (1985) *Thermoluminescence dating*. Academic, London. 359pp.
- Aitken M.J. (1998) *An Introduction to Optical Dating*. Oxford: Oxford University Press. 267pp.
- Bateman, H. (1910) Solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 15, 423-427.
- Bell, W.T. (1979) Attenuation factors for the absorbed radiation dose in quartz grains for thermoluminescence dating. *Ancient TL* 8, 2-13.
- Bell, W.T. (1980) Alpha dose attenuation in quartz grains for thermoluminescence dating. *Ancient TL* 12, 4-8.
- Berger, M.J. (1971) Distribution of absorbed dose around point sources of electrons and beta particles in water and other media. *J. Nucl. Med.* 5 (Supl.), 5-23. *MIRD/Pamphlet No. 7*.
- Berger, M.J. (1973) Improved point kernels for electron and beta-ray dosimetry. *NBSIR 73-107*; National Bureau of Standards, Washington DC.
- Brennan, B.J.; Lyons, R.G.; Phillips, S.W. (1991) Attenuation of alpha particle track dose for spherical grains. *Nucl. Tracks Rad. Meas.* 18, 249-253.
- Brennan, B.J. (2003) Beta doses to spherical grains. *Radiation Measurements* 37, 299-303.
- Brennan, B. J. (2006) Variation of the alpha dose rate to grains in heterogeneous sediments. *Radiation Measurements* 41, 1026-1031.
- Bourdon, B.; Turner, S. P., Henderson, G. M. & Lundstrom, C. C. (2003) Introduction to U-series geochemistry. In: Bourdon, B.; Henderson, G. M.; Lundstrom, C. C. & Turner, S. P. (eds.) *Uranium-Series Geochemistry*. Washington D.C.: Mineralogical Society of America.
- Cross, W.G. (1968) Variation of beta dose attenuation in different media. *Phys. Med. Biol.* 13, 611-618.
- Fleming, S.J. (1979) *Thermoluminescence techniques in archaeology*. Clarendon Press, Oxford.
- Guérin, G.; Mercier, N.; Adamiec, G. (2011) Dose rate conversion factors: update. *Ancient TL* 29, 5-8.
- Guérin, G.; Mercier, N. (2012) Preliminary insight into dose deposition processes in sedimentary media on a scale of single grains: Monte Carlo modelling of the effect of water on the gamma dose rate. *Radiation Measurements* 47, 541-547.
- Hubbell, J.H. and Seltzer, S.M. (2004) *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4)*. [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xaamdi> [year, month day]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Ivanovich, M. and Harmon, R.S. (eds) (1982) *Uranium series disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences (2nd Ed.)*. Clarendon Press, Oxford. 910pp.
- Krbetschek, M.R.; Rieser, U. and Stolz, W. (1996) Optical dating: some luminescence properties of natural feldspars. *Radiation Protection Dosimetry* 66, 407-412.
- Liritzis, I.; Singhvi A.D.; Feathers, J.K.; Wagner, G.A.; Dadereit, A.; Zacharias, N.; Li, S.-H. (2013) *Luminescence Dating in Archaeology, Anthropology, and Geoarchaeology. An Overview*. Springer Briefs in Earth System Sciences. Springer Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. 74pp.
- McNish, A. G. (1936) Geomagnetic co-ordinates for the entire Earth. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 41, 37-43.
- Mejdahl, V. (1979) Thermoluminescence dating: dose attenuation in quartz grains. *Archaeometry* 21, 61-72.

- Murray, A. S. (1981) Environmental radioactivity studies relevant to thermoluminescence dating. University of Oxford.
- Murray, A.S.; Olley, J.M. and Wallbrink, P.J. (1991) Radionuclides for analysis of sediments in water supply catchments. CSIRO Division of Water Resources, Consultancy Report 9118, Canberra.
- Murray, A.S.; Wohl, E. and East, J. (1992) Thermoluminescence and excess  $^{226}\text{Ra}$  decay dating of late Quaternary fluvial sands. East Alligator River, Australia. *Quaternary Research* 37, 29-41
- Murray, A.S.; Roberts, R.G. (1997) Determining the burial time of single grains of quartz using optically stimulated luminescence. *Earth and Planetary Science Letters* 152, 163-168.
- Nathan, R.; Thomas, P.J.; Murray, A.S.; Rhodes, E.J. (2003) Environmental dose rate heterogeneity of beta radiation and its implications for luminescence dating: Monte Carlo modelling and experimental validation. *Radiation Measurements* 37, 305-313
- Nathan, R.; Mauz, B. (2008) On the dose-rate estimate of carbonate-rich sediments for trapped charge dating. *Radiation Measurements* 43, 14-25.
- Olley, J.M.; Murray, A.; Roberts, R.G. (1996) The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burial dose rates in fluvial sediments. *Quaternary Science Reviews* 15, 751-760.
- Olley, J.; Caitcheon, G. & Murray, A. (1998) The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews* 17, 1033-1040.
- Oczkowski, H.L.; Przegliska, K.R.; Lankauf, K.R.; Smandia, J.B. (2000) Gamma spectrometry in thermoluminescence dating. *Geochronometria*, 18. 57-62.
- Prescott, J.R. and Stephan, L.G. (1982) The Contribution of Cosmic Radiation to the Environmental Dose for Thermoluminescent Dating. Latitude, Altitude and Depth Dependences. *PACT Journal (Council of Europe)* 6, 17-25.
- Prescott, J.R.; Hutton, J.T. (1994) Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements* 23, 497-500.
- Rees-Jones, J. (1995) Dating young sediments using fine grained quartz. *Ancient TL* 13, 9-14.
- Sato, T. (2016) Evaluation of World Population-Weighted Effective Dose due to Cosmic Ray Exposure. *Scientific Reports* 6, 3393.
- Smith, B.W.; Rhodes, E.J.; Stokes, S. and Spooner, N.A. (1990) The optical dating of sediments using quartz. *Radiation Protection Dosimetry* 34, 75-78.
- UNSCEAR (1998) Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Annexes. United Nations Sales Publication E.88.IX.8, United Nations, New York.
- UNSCEAR (2000) Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Annexes. United Nations Sales Publication E.00.IX.3, United Nations, New York.
- Valladas, H. & Valladas, G. (1982) Effet de l'irradiation alpha sur des grains de quartz. *PACT* 6, 171-178.
- Warren, S.E. (1978) Thermoluminescence dating of pottery: an assessment of the dose-rate from rubidium. *Archaeometry* 20, 69-70.
- Wedepohl, K.H. (1969) *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 442pp.
- Wintle, A.G. and Huntley, D.J. (1979) Thermoluminescence dating of a deep-sea ocean core. *Nature* 279, 710-712.

Wintle, A.G. and Huntley, D.J. (1980) Thermoluminescence dating of ocean sediments. *Canadian Journal of Earth Sciences* 17, 348-360.

Zimmerman, D.W. (1971) Thermoluminescence dating using fine grains from pottery. *Archaeometry* 13, 29-52.

Internet:

ENSDF (*Evaluated Nuclear Structure Data File*): [www.nndc.bnl.gov](http://www.nndc.bnl.gov)

<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>

<https://www.iaea.org/publications/reports/annual-report-2003>

<http://www.unscear.org/>

<http://ec.europa.eu/dgs/jrc/>

<https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/>



## Capítulo 5.

Incertidumbre en la señal OSL y modelos de edad.





### 5. Incertidumbre en la señal OSL y modelos de edad.

La Dosis equivalente ( $De$ ) estimada para una muestra dada a partir de los datos individuales que ofrecen de manera independiente cada una de las alícuotas que la representan incluye, además, su error asociado. Los factores que originan esta incertidumbre son variados y se relacionan, entre otros, con el tipo de mineral empleado, los aparatos de medida, las condiciones naturales del medio e historia de los propios granos, la variabilidad entre la señal de las propias alícuotas, etcétera. El desarrollo de la técnica de datación empleando diferentes materiales y en distintos medios ha derivado en una reducción del error sistemático y en un mejor entendimiento del error aleatorio asociado, lo que ha propiciado el desarrollo de distintos modelos de edad aplicables en función de las características de la distribución de las estimaciones que presente cada muestra.

#### 5.1. Tipos de error y Factores de dispersión.

Las causas que generan un aumento de la dispersión en la distribución de estimaciones individuales se atribuye principalmente a factores como variación en el número de cuentas o fotones emitidos por cada alícuota y su relación con el tamaño de dosis aplicado. Esta fuente de variabilidad es independiente de las variaciones en la sensibilidad de luminiscencia que puedan presentar las propias alícuotas al aplicar sobre ellas los distintos tratamientos térmicos, radiactivos y lumínicos, etcétera, del protocolo SAR. También influyen fenómenos como blanqueo incompleto de la señal (y que se explicará a continuación en el apartado 5.1.2), heterogeneidad en la tasa de radiación natural ( $DR$ ) y las variaciones micro-dosimétricas que puedan generarse en el ambiente sedimentario (ver apartado 4.2.1.3.1.), o también aspectos técnicos relativos a la propia reproductibilidad de los equipos empleados (Thomsen et al., 2005).

Dentro de esta incertidumbre, se consideran distintos tipos de error. Así, el error sistemático, propio de la metodología y aparatos empleados, incluye el error instrumental o la calibración de la fuente de radiación artificial, aunque también se considera error sistemático al asociado a los materiales cuando su señal de luminiscencia OSL, al aplicar el protocolo SAR, está próxima o integrada en la zona de saturación, en relación a la fiabilidad de las estimaciones en esa zona de la curva de crecimiento (Bailey, 2000a; Murray et al, 2002; Jacobs et al., 2006a). El error instrumental se estima aplicando en el laboratorio una serie de protocolos que permiten corregir o eliminar la influencia de las fuentes de error aleatorio o variación extrínsecas, como blanqueamiento parcial y heterogeneidad en la microdosimetría, aplicando tratamientos ópticos y térmicos que blanquean completamente la señal, así como dosis de radiación artificial controladas (Thomsem et al., 2005). Este tipo de error presenta pequeñas variaciones del orden del 1% para muestras con buena señal (Armitage and Bailey, 2005) aunque hay otros autores que lo estiman en 1,5% (Thomsen et al., 2005; Jacobs et al., 2006b) y otros en 2,5% (Rodnight et al., 2006), pudiendo variar entre distintos instrumentos de medida o para un mismo instrumento a lo largo del tiempo, por lo que, para este error en reproductibilidad

instrumental se asume una contribución a la incertidumbre final por debajo del 3.5% (Truscott et al., 2000; Galbraith et al., 2005).

Respecto a la incertidumbre asociada a la fuente de radiación artificial beta ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) el error depende, más que de la propia fuente (la cual se calibra periódicamente), de la composición de los materiales, del tamaño de grano y de distancia de las alícuotas a la fuente beta dentro del lector. Respecto al primer factor, tanto para la técnica de luminiscencia OSL o TL, la respuesta de los materiales empleados como el cuarzo y el feldespato no difiere. Por otra parte, el error asociado a la distancia entre la fuente y las alícuotas representaría una ínfima fracción del error sistemático, y la selección del tamaño de grano más adecuado a la fuente radiactiva guarda relación con el poder de penetración de la radiación emitida. Así, y aunque los factores de incertidumbre asociados a la fuente de radiación beta empleada son atenuación, (retro)dispersión e incremento/acumulación, las correcciones pertinentes se realizan únicamente a efectos de atenuación, empleando los factores de corrección de radiación beta de Brennan (2003), ya comentados (ver último párrafo del apartado 4.2.1.3.1.).

#### 5.1.1. Variaciones en el número de cuentas y magnitud de la dosis.

La calidad y las fluctuaciones de la señal de luminiscencia varían para cada muestra. En muchos casos, la señal de luminiscencia se puede relacionar con el tiempo de enterramiento, de manera que, para las muestras antiguas con largos periodos de enterramiento (5ka a 500ka) se obtiene generalmente una señal OSL intensa, con una elevada relación señal/ruido (*signal to noise ratio*) y una distribución de los datos que tiende a seguir una distribución de tipo normal, simétrica y con un fuerte apuntamiento. No obstante, para este tipo de muestras antiguas, con una dosis equivalente más elevada, la magnitud de la dosis inducida en el SAR para regenerar el resto de señales (y construir la curva de crecimiento) va a resultar también elevada, incrementándose también el error asociado -existe una relación directa entre el tamaño de la *De* y el error absoluto (Arnold and Roberts, 2009). A ello se suma el aumento de la probabilidad de interpolación de la señal natural OSL dentro del umbral o zona de saturación de la curva de crecimiento cuando se emplean dosis altas, lo que conlleva, a su vez, un incremento de la incertidumbre, perdiendo fiabilidad (Murray and Olley, 2002; Singarayer and Bailey, 2003; Wintle and Murray, 2006). Esto es así debido a que en esta zona de saturación la curva responde a un ajuste lineal de pendiente cero, esto es, una línea recta y plana en la parte superior de la curva, en la que cualquier interpolación proyectada sobre ella abarcaría un amplio rango de dosis al incluir el rango de error asociado.

Por su parte, las muestras jóvenes, con un menor tiempo de enterramiento (<1ka), ofrecen hipotéticamente una señal natural OSL más débil (decenas de mGy) que puede resultar insuficiente como para presentar una respuesta aceptable, presentando, además, un bajo ratio señal/ruido, con las consiguientes imprecisiones estadísticas y error sistemático que ello conlleva (Huntley et al., 1996). A pesar de las mejoras desarrolladas en

la detección y reproductibilidad como el uso de filtros que seleccionen la señal recibida por el tubo fotomultiplicador, la fuente luminosa y su longitud de onda o voltaje (Stokes, 1992), el comportamiento de las muestras a efectos de señal de luminiscencia puede no responder a estos preceptos generalizados.

#### 5.1.2. Blanqueamiento incompleto de la señal.

El blanqueamiento incompleto o parcial de la señal OSL o IRSL, es un fenómeno que provoca un incremento de la dispersión y la incertidumbre. Para los depósitos eólicos se asume que los granos de la muestra han estado expuestos a la luz solar el tiempo suficiente antes de su enterramiento como para blanquear completamente la señal (Duller, 2004). No obstante, para los depósitos fluviales y debido a fenómenos de turbidez o un periodo de transporte insuficiente (Rittenour, 2008; Duller, 2008), la probabilidad de un blanqueo completo puede verse reducida, dando lugar a la existencia de una señal residual heredada de su antiguo emplazamiento en algunos granos de cuarzo o feldespato, y que se sumaría a la que se genera durante el enterramiento en el lugar de muestreo. Esta suma o acumulación de señales incrementa de forma artificiosa la señal OSL relativa al último periodo de enterramiento, degenerando en una sobrestimación de la *De* y la edad (Olley, 1999), y afectando también al error asociado. Resulta, por tanto, conveniente prestar atención a las características de la distribución ya que proporcionan información acerca de estos aspectos (Roberts, 1998; Jacobs, 2003).

En el caso de muestras que presenten una carga residual debido a un blanqueamiento incompleto de la señal OSL, es esperable observar distribuciones con una amplia dispersión, asimetría y/o bimodalidad (o multimodalidad), presentando distintas poblaciones cuyos valores centrales corresponden a dosis diferentes. Esta fuente de variabilidad puede detectarse mediante diferencias entre las medias aritmética y ponderada, gráficos como histogramas o diagramas radiales (*radial-plot*), y será determinante para aplicar el modelo de edad más adecuado para la estimación de la *De*. Por otro lado, una alícuota contiene un determinado número de granos -de pocas decenas a unos cientos- por lo que la variabilidad en la estimación de la dosis equivalente (*De*) de cada uno de los granos puede quedar enmascarada por la medición simultánea de todos ellos (Olley et al., 1999; Wallinga et al., 2000; Wallinga, 2002). Ante la presencia de blanqueamiento incompleto para alícuotas multi-grano, con granos con carga residual y con granos sin esta señal añadida, el número de granos por alícuota es determinante para reducir esta fuente de error. Una solución pasaría por realizar un análisis de la señal OSL (o IRSL) a partir de alícuotas de grano simple (*single grain*). No obstante, se descarta esta posibilidad ya que la unidad de luminiscencia empleada durante el tiempo en que se ha realizado el presente trabajo no está equipada para ello. Otra solución, en presencia de señales débiles o de baja intensidad, pasa por incluir un mayor número de granos en cada alícuota a fin de potenciar la señal, con el inconveniente de enmascarar el error asociado, entre otros, a este fenómeno (David, et al. 2007; Jacobs et al., 2007).

## 5.2. Estadística aplicada a luminiscencia (OSL e IRSL).

El tratamiento de datos aplicado a la datación mediante luminiscencia OSL (e IRSL) abarca, principalmente, el cálculo matemático de la señal integrada y su incertidumbre para la estimación de la dosis equivalente ( $De$ ) de cada una de las alícuotas. Por otra parte, se incluye el análisis estadístico y estudio de la variabilidad muestral, así como la aplicación de distintos modelos, cuando los parámetros centrales como la media aritmética o la mediana, no proporcionan datos fiables. Todos estos aspectos se desarrollarán en el siguiente apartado.

### 5.2.1. Cálculo de la señal individual integrada y su incertidumbre.

La estimación de la incertidumbre ( $S_n$ ) de las dosis individuales ( $D_n$ ) -de cada una de las alícuotas que superaron los criterios de aceptación pertinentes- se basa únicamente en estadística de cuentas de luminiscencia (*photon counting statistics*) de la señal OSL integrada. Esta señal OSL integrada es la que resulta de la contabilidad de las cuentas de luminiscencia de la señal OSL inicial –correspondiente a la componente de la señal OSL rápida, registrada en los primeros 0.5 segundos aproximadamente- de la que se substraen las cuentas correspondientes a la señal de fondo -cuyo intervalo varía en función del método LBG o EBG empleado. Así, esta señal integrada ( $L_x$ ) -y posteriormente corregida con su señal de normalización correspondiente ( $T_x$ )- se interpolará en la curva de crecimiento, obteniéndose una estimación de la  $De$  con su error. Lo novedoso a este respecto es que, asumiendo que la distribución de todos los datos estimados por cada alícuota sigue una distribución de *Poisson*, se integrará el error individual de cada una de ellas en el error neto o muestral (Thomsen et al., 2005).

Matemáticamente la señal total ( $Y$ ), medida en cuentas por unidad de tiempo y registrada en intervalos de tiempo denominados canales ( $i$ ), se calcula como el sumatorio de cada señal recogida en cada uno de los canales ( $Y_i$ ) que conforman la componente rápida correspondiente a los ( $n$ ) primeros canales ( $Y_n$ ), luego

$$Y_n = \sum_{i=1}^n Y_i .$$

La señal de fondo ( $B$ ) se asume constante e integra un determinado número de canales ( $m$ ),

siendo ( $m$ ) múltiplo de ( $n$ ), luego  $m=kn$ . Así se obtiene la señal de fondo ( $B_m$ ). Con ambas señales, como ya se

comentó, se obtendrá una señal neta integrada ( $L_n$ ) mediante la expresión  $L_n = Y_n - \frac{B_m}{k}$ , siendo  $k=m/n$ . La

estimación de la desviación típica se obtendrá mediante la expresión  $S_{L_n}^2 = \frac{Y_n + B_m}{k^2}$  (Galbraith, 2002). Estas

fórmulas también se emplean para la correspondiente señal de normalización del *Test-dose* ( $T_x$ ) y su error.

Una vez determinada la señal natural OSL normalizada ( $L_N/T_N = R_n$ ) para cada alícuota, la  $De$  o dosis natural ( $D_n$ ) puede estimarse interpolando entre dos puntos regenerados mediante la expresión

$$D_n = \frac{(R_n + R_1)}{(R_2 - R_1)}(D_2 - D_1) + D_1$$

siendo  $R_n$  la señal natural corregida, y  $R_1$  y  $R_2$  los puntos de interpolación resultantes de  $L_1/T_1$  y  $L_2/T_2$  a dosis inducidas  $D_1$  y  $D_2$ , respectivamente (Thomsen et al., 2005).

Además, la desviación típica relativa ( $RSD$  o  $\sigma^2$ ) de cada señal normalizada ( $R_i$ ) se estima mediante la expresión

$\sigma_{R_i}^2 = \left(\frac{S_{R_i}}{R_i}\right)^2 = \left(\frac{S_{L_i}}{L_i}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_i}}{T_i}\right)^2$  donde  $L_i$  es la señal OSL integrada y  $T_i$  es la señal OSL integrada del *Test-dose*, correspondiente al ciclo  $i$ .

Así, aplicando la ley de propagación del error para incluir el error individual en el neto, la desviación típica de la dosis natural estimada ( $D_n$ ) viene dado por la ecuación

$$S_{D_n}^2 = \left(\frac{(D_2 - D_1)}{(R_2 - R_1)}\right)^2 \times \left\{ S_{R_n}^2 + \left(\frac{1}{R_2 - R_1}\right)^2 \times [(R_n - R_2)^2 S_{R_1}^2 + (R_n - R_1)^2 S_{R_2}^2] \right\}$$

donde  $S_{R_n}$ ,  $S_{R_1}$  y  $S_{R_2}$  son la desviación típica de  $R_n$ ,  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente, obteniendo así, para cada alícuota, la  $De$  individual y su error.

### 5.2.2. Modelo de ajuste exponencial+lineal.

Otro modelo de cálculo de la  $De$  individual y su error está basado en un ajuste a la curva de crecimiento de tipo exponencial+lineal mediante la expresión:

$$R(D) = I_{\max} [(1 - \exp(-D/D_0)) + c] \xrightarrow{\text{también}} Y = a [(1 - \exp(-x/b)) + cx]$$

Los parámetros de este tipo de ajuste se obtienen de los propios datos, donde  $Y$  o  $R(D)$  es el ratio que se determina al construir la curva a partir de dosis dadas ( $D_1, D_2, \dots$  obteniendo  $R_1, R_2, \dots$ ) y que es dependiente de  $b$  o ( $D_0$ ), que es la dosis característica de saturación, siendo  $a$  el valor intensidad máxima de luminiscencia ( $I_{\max}$ ) o de saturación en la curva de crecimiento, y  $c$  la pendiente de la parte lineal de la ecuación (Hayes et al., 1998; Press et al., 1986).

El error estándar asociado a la  $De$  no se calcula a partir de la dispersión que presentan los puntos que conforman la curva de crecimiento ya que el número de éstos no es mucho mayor que los parámetros que conforman la fórmula o ajuste a la curva -por lo que no hay suficientes grados de libertad. Para ello se emplean los valores de la señal individual y su error.

El error de la señal inicial ( $\gamma_{Lx}$ ) y el error del *Test dose* ( $\gamma_{Tx}$ ) se estiman, en este modelo de ajuste, en base a la

fórmula de Banerjee (2000)  $\gamma_{Lx} = \frac{\sqrt{\sum (S_i + 2\bar{B}_n)}}{\sum (S_i - \bar{B}_n)}$ , siendo  $S_i$  las cuentas de cada canal ( $i$ ) que conforman la señal

inicial, y  $\bar{B}_n$  el promedio de cuentas correspondientes a los ( $n$ ) canales que conforman la señal de fondo.

El error asociado a la señal neta corregida ( $\sigma_{Lx/Tx}$ ) se obtendrá mediante la expresión

$$\sigma_{Lx/Tx} = L_x / T_x \cdot \sqrt{(\gamma_{Lx} / L_x)^2 + (\gamma_{Tx} / T_x)^2}.$$

### 5.2.3. Estudio de la varianza.

El error relativo asociado que presenta una alícuota se atribuye, como se ha comentado, a variaciones en estadística de cuentas así como a la incertidumbre en el ajuste a la curva de crecimiento, siendo ésta la varianza intra-alícuotas. No obstante, la varianza observada en la estimación de la *De* muestral suele ser mayor que la explicada por esta varianza intra-alícuotas. Como la estimación final se obtiene a partir de los valores individuales de un número estadísticamente significativo de datos individuales, hay que tener en cuenta la variabilidad que se observa entre ellos, lo que hace referencia a la varianza entre-alícuotas o sobre-dispersión (*over-dispersion* u *OD*).

Esta sobre-dispersión (*OD*) se genera de forma natural por varios factores. Uno de ellos se debe a la variabilidad en el rango de señales obtenido y que se relaciona con la cantidad de trampas OSL y centros de recombinación activos así como el comportamiento de los distintos granos de una muestra (p.ej. a efectos de sensibilidad o respecto a recuperación de la señal, etc.). También afectan otros factores como la dispersión en la estimación de la *De* relacionada con el grado de blanqueamiento de los minerales o heterogeneidad en la microdosimetría, entre otros aspectos, o la diferencia existente entre las dosis regeneradas empleadas para interpolar en cada una de las medidas independientes. Así, la varianza observada, intra y entre alícuotas, derivará en un error intra-alícuotas ( $\sigma_i$ ) y entre-alícuotas ( $\sigma_e$ ), y calculando el estimador de cada uno de ellos se obtendría el error estándar de la *De* mediante la suma de los cuadrados, también citado anteriormente.

En el caso ideal en el que todas las alícuotas reciban una misma dosis (sea natural o artificial) y, asumiendo que el logaritmo de la *De* ( $\log D_e$ ) de cada grano ( $i$ ) siga una normal con media ( $m$ ) y varianza ( $(\sigma_e)^2 + (\sigma_i)^2$ ) (Galbraith et al., 2005), se podrá estimar la varianza entre-alícuotas si se tiene controlada la varianza intra-alícuotas. El problema, como ya se comentó, reside en que habitualmente y para una muestra determinada, los granos que conforman las alícuotas son heterogéneos, pudiendo presentar blanqueamiento incompleto de la señal, variaciones en la micro-dosimetría (derivadas de una tasa de radiación beta heterogénea en el propio lugar de muestro) o han experimentado remoción y/o mezcla dentro del sedimento, etc. El análisis y comparación de las distribuciones de cada alícuota es una alternativa para obtener una aproximación de los

valores esperados para cada una de estas componentes de la varianza. Además, los datos obtenidos a partir del porcentaje de recuperación y reciclaje, así como la sobre-dispersión estimada a partir del *Dose-recovery test*, pueden resultar útiles para estimar el error que no está generado por los problemas como blanqueamiento incompleto, remoción o heterogeneidad beta y que son los que generan la sobre-dispersión, la cual varía para cada muestra y condiciones de medida. No obstante esta aproximación, también puede resultar insuficiente a efectos de infra-estimación, recomendándose la aplicación los modelos estadísticos más adecuados (CAM, MAM, IEU, etc.).

#### 5.2.4. Modelos de edad desarrollados para la estimación de la *De*.

En principio, la distribución de los datos individuales obtenidos a partir de las alícuotas se analiza numérica y gráficamente para obtener una estimación de la *De* de interés, que será aquella que se corresponde con la dosis acumulada por los granos a lo largo del tiempo en el que han permanecido enterrados en el sedimento por última vez. No obstante, y como se viene comentando a lo largo del capítulo, procesos de remoción, blanqueamiento incompleto o heterogeneidad beta pueden provocar a que dentro de la propia distribución de la muestra existan poblaciones de granos con distinta dosis acumulada. Para ello se han desarrollado modelos estadísticos como el *Central age models* (CAM), el *Minimun age models* (MAM) (Galbraith et al., 1999; 2005) y el *Internal-External consistency criteria* (IEU) (Thomsen et al., 2003; 2007) que, en general, más que ofrecer una estimación exacta, facilitan la interpretación de los resultados, aplicándose uno u otro modelo en función de la distribución de los datos, radicando aquí la importancia del análisis gráfico de la misma.

##### 5.2.4.1. Modelos de edad central (CAM).

Debido a que la sobre-dispersión (*OD*) asociada a la estimación de *De* -a partir de estimaciones realizadas mediante alícuotas independientes conformadas por un determinado número de granos de cuarzo- presenta valores generalizados de aproximadamente un 20% (Olley et al., 1999), incluso en ausencia de blanqueamiento incompleto, remoción o heterogeneidad beta, se ha desarrollado el modelo de edad central CAM (*Central age models*; Galbraith, 1999; 2005).



En este modelo se asume que el valor verdadero del logaritmo de la  $De$  ( $\log D_e$ ) sigue una distribución normal de media ( $\delta$ ) y una desviación estándar ( $\sigma$ ), siendo este último parámetro la sobre-dispersión o varianza entre-alícuotas que permanece una vez extraída la varianza intra-alícuotas. La estimación de ambos se calcula aplicando el método de máxima verosimilitud ( $EMV$ ) mediante las expresiones

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{y} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 (d_i - \delta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i}}$$

a partir de medidas individuales, donde ( $d_i$ ) es la estimación del logaritmo de la dosis individual con su error ( $\sigma_i$ ) y en donde la ponderación viene dada por la expresión  $w_i = [1/(\sigma)^2 + (\sigma_i)^2]$ . Para dicha estimación, los valores con menor incertidumbre tienen mayor peso (Galbraith et al, 1999).

En este modelo se realizarán un número variable de iteraciones en donde la sobre-dispersión ( $OD$ ) toma distintos valores. La dosis correspondiente al valor central se obtiene como exponente [ $\exp(\delta)$ ] y es equivalente a la media geométrica ( $\sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_N}$ ) de la distribución de los valores verdaderos de la  $De$ , mientras que la sobre-dispersión ( $OD$ ) se relaciona con la desviación típica relativa ( $RSD$  o coeficiente de variación) de la misma. El porcentaje de sobre-dispersión relativa se determina mediante la fórmula  $OD = \sigma/\delta$  y su error estándar correspondiente ( $L_\sigma$ ) mediante la expresión  $L_\sigma = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{\log w_i - w_i (d_i - \delta)^2\}$  (Galbraith and Roberts, 2012).

#### 5.2.4.2. Modelos de edad mínima (MAM).

La aproximación que ofrecen el modelo MAM (*Minimum age models*) puede resultar más fiable cuando se observa una distribución en donde una población de granos albergan una carga residual por blanqueamiento incompleto o remoción, o ambas.

En este modelo se asume, por convenio y simplificación, que el logaritmo de la  $De$  ( $\log D_e$ ) de la población de granos dentro de la distribución que sí presenta blanqueamiento completo sigue – a diferencia de la población con carga residual- una distribución de tipo normal, pero truncada. En esta distribución normal truncada el punto de corte menor ( $\gamma$ ) se corresponde con el valor promedio verdadero del logaritmo de la  $De$  de esta población de granos bien blanqueados. A partir de los valores que estén por debajo de ( $\gamma$ ) se estima la variación y el error de la misma, y los valores superiores a ese promedio corresponderán a la población que presenta granos con blanqueamiento incompleto (Galbraith et al., 1999).

En este modelo, al medirse un número variable de granos por alícuota, la estimación de la dosis mínima podría ser superior al valor real de la *De* asociada a los granos bien blanqueados, debido a la influencia de granos con carga residual. El número apropiado de estimadores independientes, lo que se traduce como el número de alícuotas estadísticamente consistentes para el estudio de la distribución de la *De* para determinar la edad de enterramiento con un mínimo de precisión, es muy variable entre las distintas muestras (p.ej. en función del grado de blanqueamiento, dispersión, etc.). Además, la precisión variará también en función del contexto y rango de edades, así, por ejemplo, para muestras con poblaciones cuyo grado de blanqueamiento varía, es recomendable contar con un mínimo de 50 medidas independientes (Rodnight, 2008) que, en casos de amplia dispersión y una población pequeña de granos bien blanqueados, puede resultar insuficiente.

#### 5.2.4.3. Método de estimación IEU.

El método estadístico IEU (*Internal-External Consistency Criteria*) propuesto por Thomsen (2003), permite la estimación de la *De* para distribuciones afectadas por blanqueamiento incompleto a partir de aquellas alícuotas que sí presentan un buen blanqueamiento.

La alta dispersión que generalmente se observa en muestras que presentan un blanqueamiento incompleto o parcial se podría atribuir a factores intrínsecos (fluctuaciones en el número de cuentas; reproductibilidad instrumental; transferencia térmica, etc.) así como a factores extrínsecos (blanqueamiento incompleto antes de la deposición, heterogeneidad de la radiación natural o remoción del sustrato -es importante tener en cuenta que una baja dispersión en la distribución de la *De* no garantiza la ausencia de blanqueamiento incompleto) por lo que la cuantificación de los primeros ayudará determinar la contribución de estos últimos.

Es deseable, por tanto, distinguir la población de interés conformada por aquellas alícuotas con un buen blanqueamiento y para ello, según este modelo, se analiza qué parte del error de cada una de las medidas respecto al conjunto se debe a factores intrínsecos y/o extrínsecos, de manera que se pueda elegir aquellas alícuotas cuya incertidumbre no se vea incrementada por estos factores externos, de modo que no afecten la varianza muestral y evitando así incrementar el error neto. Para ello se extrae, del error estándar de la media ponderada, la incertidumbre debida a las propias variaciones intrínsecas de la muestra y la variación debida a aspectos como el borrado parcial de la señal.

En la aproximación del modelo IEU se asume que los datos procedentes de la población conformada por los granos bien blanqueados sigue una distribución normal cuya sobre-dispersión está únicamente afectada, de forma ideal, por factores intrínsecos.

El cálculo de la media ponderada se estima mediante la expresión  $Z = \frac{\sum_{i=1}^n D_i / \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / \sigma_i^2}$  donde ( $D_i$ ) es la estimación

individual de la dosis y ( $\sigma_i$ ) su incertidumbre.

La estimación del error estándar ( $\alpha$ ) asociado se puede realizar mediante el cálculo de los estimadores ( $\alpha_i$ ) y ( $\alpha_e$ ) como medida de la contribución al error de factores internos y externos respectivamente (Topping, 1995), es decir, la incertidumbre externa ( $\alpha_{ext}$ ) y la incertidumbre interna ( $\alpha_{int}$ ), aplicando las siguientes expresiones

$$\alpha_{int}^2 = 1 \div \left( \sum_{i=1}^n 1 / \sigma_i^2 \right) \quad \text{y} \quad \alpha_{ext}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n D_i - Z / \sigma_i^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n 1 / \sigma_i^2}, \text{ en donde } n \text{ es el número de alícuotas.}$$

La incertidumbre interna se estima como un cálculo individual y la incertidumbre externa combina la estimación individual de incertidumbre ( $\sigma_i$ ) con la desviación respecto a la media ponderada ( $D_i - Z$ ). Así, si únicamente se observa como fuente de incertidumbre la individual ( $\sigma_i$ ), para alícuotas en las que se realiza un número de mediciones amplio, esta se aproximará al cuadrado de la varianza individual ( $\sigma_i^2$ ), equiparándose la incertidumbre externa y la interna ( $\alpha_{ext} = \alpha_{int}$ ) al obtenerse la expresión

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n D_i - Z}{(n-1)} = \sigma_i^2$$

Para una muestra de tamaño grande que siga una distribución normal y en donde el error puede ser estimado mediante el cálculo de la varianza ( $\sigma_i$ ), el ratio entre la desviación externa e interna [ $(\alpha_e)/(\alpha_i)$ ] se aproxima a la unidad con un error de  $[2(n-1)^{-0.5}]$ . Cuando la varianza muestral se ve afectada por granos con carga residual (por blanqueamiento incompleto) este ratio [ $(\alpha_e)/(\alpha_i)$ ] puede emplearse para seleccionar, dentro de la distribución, aquellas alícuotas pertenecientes a la zona de menor  $De$  estimada, que serán las que presenten un mayor número de granos bien blanqueados.

### 5.3 Distribución de datos

Como ya se comentó, existe una relación directa entre la dispersión, el número de granos que componen las alícuotas y la fracción de aquellos que emiten luminiscencia (Li,1994; Wallinga, 2002) por lo que, para identificar de manera fidedigna los diversos factores de dispersión y variabilidad -como el blanqueamiento incompleto- mediante las características que presenta la distribución los datos, es conveniente que el número de granos sea el menor posible. No obstante, independientemente del tamaño de las alícuotas, la estimación de la  $De$  se presenta como un rango delimitado por un valor real y su incertidumbre. Esta incertidumbre también varía entre las propias estimaciones individuales, incluyéndose el error individual de cada alícuota para cada una de las fuentes de variación (tanto intrínsecas como extrínsecas). Dada esta complejidad resulta necesario analizar la distribución de los datos para conocer el grado en el que el error individual describe de forma fiable la variabilidad muestral (Thomsen et al., 2005).

#### 5.3.1. Análisis de la dispersión y gráficos de distribución.

La distribución de las estimaciones individuales de la  $De$  puede analizarse de manera sencilla a partir histogramas. No obstante, este tipo de gráficos no incluyen el error asociado, por lo que los valores mayoritarios que toma la población, modas o promedios pueden resultar confusos o engañosos. Por otra parte, los gráficos de dispersión, en donde se representan la señal corregida ( $L_x/T_x$ ) frente a la  $De$  como medida de la contribución de cada alícuota al error total, o la señal natural del *Test dose* ( $T_n$ ) como medida de sensibilidad, sí incluyen el error, formando parte de un primer análisis fiable para determinar las posibles fuentes de variación.

Un tipo de gráfico de dispersión más complejo es el gráfico radial (*radial-plot*) en el que se representa el grado y extensión de la sobre-dispersión -independientemente de las causas que la originen- y en el cual se enfrentan la estimación estándar de cada alícuota ( $Y_i - Y_0 / S_i$ ) frente a la inversa del error o precisión ( $1 / S_i$ ), siendo ( $Y_i$ ) la  $De$  estimada de la alícuota ( $i$ ) sin su error estándar, e ( $Y_0$ ) un valor de referencia (generalmente la  $De$  muestral esperada). Así, la  $De$  individual estimada por cada una de las alícuotas están representada puntos. Cada punto une el origen (0,0) -determinado por esa estimación de referencia estandarizada- con el eje Y radial en el cual se representan las dosis a escala logarítmica ( $\log De$ ). Esta transformación logarítmica se emplea de manera generalizada y, preferentemente, cuando el error estándar se incrementa con el tamaño de la  $De$  muestral o cuando hay un amplio rango de valores estimados para la misma e implica, además, que si  $Y_i$  y  $S_i$  son la estimación y el error estándar del logaritmo de la  $De$ ,  $S_i$  también se corresponde con el error estándar relativo de la  $De$ .

Por su parte, en el eje X se representa el porcentaje de error relativo asociado o su inversa (la precisión), antes mencionados. Además, el punto origen puede representarse como una barra de error de longitud  $\pm 2\sigma$  y prolongarse en forma de banda hacia el eje radial, cuya área representa un intervalo de confianza (i.c.) del 95%, lo que permite observar visualmente la consistencia de las estimaciones individuales y su ajuste con un valor de  $De$  estimado estadísticamente. Por lo tanto, si la incertidumbre se basa únicamente en estadística de cuentas, la desviación estándar relativa observada en la distribución ( $RSD$  muestral) debería ser similar a la estimación de la incertidumbre individual esperada o error relativo de cada alícuota, es decir, la división del error individual y la  $De$  correspondiente ( $S_{Dn}/D_n$ ). En este caso, cuasi-ideal, la incertidumbre esperada o individual explica la variabilidad muestral y el 95% de los puntos debería ubicarse dentro de la banda  $\pm 2\sigma$  (Thomsen et al., 2003; 2007; Galbraith and Roberts, 2012).

## 5.4. Bibliografía.

- Armitage, S.J. and Bailey, R.M. (2005) The measured dependence of laboratory beta dose rates on sample grain size. *Radiation Measurements* 39, 123-127.
- Arnold, L.J.; Roberts, R.G. (2009) Stochastic modelling of multi-grain equivalent dose ( $D_e$ ) distributions: implications for OSL dating of sediment mixtures. *Quaternary Geochronology* 4, 204-230.
- Bailey, R.M. (2000a) The slow component of quartz optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 32, 233-246.
- Bailey, R.M. (2000b) The interpretation of quartz optically stimulated luminescence equivalent dose versus time plots. *Radiation Measurements* 32, 129-140.
- Banerjee, D.; Botter-Jensen, L.; Murray, A.S. (2000) Retrospective dosimetry: estimation of the dose to quartz using the single-aliquot regenerative-dose protocol. *Applied Radiation and Isotopes* 52, 831-844.
- Brennan, B.J. (2003) Beta doses to spherical grains. *Radiation Measurements* 37, 299-303.
- David, B.; Roberts, R.G.; Magee, J.; Mialanes, J.; Turney, C.; Bird, M.; White, C.; Fifield, L.K.; Tibby, J. (2007) Sediment mixing at Nonda Rock: investigations of stratigraphic integrity at an early archaeological site in northern Australia and implications for the human colonisation of the continent. *Journal of Quaternary Science*. 22, 449-479.
- Duller, G. A. T. (2004) Luminescence dating of Quaternary sediments: Recent advances. *Journal of Quaternary Science* 19, 183-192.
- Duller, G.A. (2008) Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating. *Boreas* 37, 589-612.
- Galbraith, R.F.; Roberts, R.G.; Laslett, G.M.; Yoshida, H.; Olley, J.M. (1999) Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41, 339-364.
- Galbraith, R.F. (2002) A note on the variance of a background-corrected OSL count. *Ancient TL* 20, 49-51.
- Galbraith, R.F.; Roberts, R.G.; Yoshida, H. (2005) Error variation in OSL palaeodose estimates from single aliquots of quartz: a factorial experiment. *Radiation Measurements* 39, 289-307.
- Galbraith, R.F.; Roberts, R.G. (2012) Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: an overview and some recommendations. *Quat. Geochronol.* 11, 1-27.
- Hayes, R. B.; Haskell, E. H.; Kenner, G. H. (1998) An assessment of the Levenberg-Marquardt fitting algorithm on saturating exponential data sets. *Ancient TL* 16, 57-62.
- Huntley, D.J.; Short, M.A.; Dunphy, K. (1996) Deep traps in quartz and their use for optical dating. *Can. J. Phys.* 74, 81-91.
- Jacobs, Z.; Duller, G. A. T.; Wintle, A. G. (2003). Optical dating of dune sand from Blombos Cave, South Africa: II - Single grain data. *Journal of Human Evolution* 44, 613-625.
- Jacobs, Z.; Duller, G.A.T.; Wintle, A.G. (2006a) Interpretation of single grain  $D_e$  distributions and calculation of  $D_e$ . *Radiation Measurements* 41, 264-277.
- Jacobs, Z.; Wintle, A. G.; Duller, G. A. T. (2006b). Evaluation of SAR procedures for  $D_e$  determination using single aliquots of quartz from two archaeological sites in South Africa. *Radiation Measurements* 41, 520-533.
- Jacobs, Z.; Roberts, R.G. (2007) Advances in optically stimulated luminescence dating of individual grains of quartz from archeological deposits. *Evol. Anthropol.* 16, 210-223.
- Li, S.-H. (1994) Optical dating: insufficiently bleached sediments. *Radiation Measurements* 23, 563-567.

- Murray, A. S. & Olley, J. M. (2002) Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria* 21, 1–15.
- Olley, J. M., Caitcheon, G. G. & Roberts, R. G. (1999) The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 30, 207–217.
- Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T. (1986). *Numerical Recipes: The art of scientific computing*. Cambridge University Press.
- Rittenour, T.M. (2008) Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological research. *Boreas* 37, 613–635.
- Roberts, R.; Bird, M.; Olley, J., Galbraith, R.; Lawson, E.; Laslett, G.; Yoshida, H.; Jones, R.; Fullagar, R., Jacobsen, G.; Hua, Q. (1998) Optical and radiocarbon dating at Jinmium rock shelter in northern Australia. *Nature* 393, 358–362.
- Rodnight, H.; Duller, G.A.T.; Wintle, A.G.; Tooth, S. (2006) Assessing the reproducibility and accuracy of optical dating of fluvial deposits. *Quaternary Geochronology* 1, 109–120.
- Rodnight, H. (2008) How many equivalent dose values are needed to obtain a reproducible distribution? *Ancient TL* 26, 3–9.
- Singarayer, J.S.; Bailey, R.M. (2003) Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation. *Radiation Measurements* 37, 451–458.
- Stokes, S. (1992) Optical dating of young (modern) sediments using quartz: results from a selection of depositional environments. *Quaternary Science Reviews* 11, 153–159.
- Thomsen, K.J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L.; Jungner, H. (2003) Variation with depth of dose distributions in single grains of quartz extracted from an irradiated concrete block. *Radiation Measurements* 37, 315–321.
- Thomsen, K.J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L. (2005) Sources of variability in OSL dose measurements using single grains of Quartz. *Radiation measurements* 39, 47–61.
- Thomsen, K.J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L.; Kinahan, J. (2007) Determination of burial dose in incompletely bleached fluvial samples using single grains of quartz. *Radiation Measurements* 42, 370–379.
- Topping, J. (1955) *Errors of observation and their treatment*. The Institute of Physics and The Physical Society, London, pp. 91–93.
- Truscott, A.J.; Duller, G.A.T.; Bøtter-Jensen, L.; Murray, A.S.; Wintle, A.G. (2000) Reproducibility of optically stimulated luminescence measurements from single grains of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C and annealed quartz. *Radiation Measurements* 32, 447–451.
- Wallinga, J.; Murray, A.; Wintle, A. (2000) The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. *Radiation Measurements* 32, 529–533.
- Wallinga, J. (2002) Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. *Boreas* 31, 303–322.
- Wintle, A.G.; Murray, A.S. (2006) A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41, 369–391.

## Capítulo 6.

Señal IRSL y pIR-IRSL de feldespatos.





## 6. Señal IRSL y PIR-IRSL de feldespatos.

La utilización de feldespatos para obtener la señal IRSL presenta algunas ventajas, respecto al cuarzo, como una mayor intensidad de la señal de luminiscencia, un mayor umbral de saturación y una curva de crecimiento o de respuesta más amplia por lo que, en principio, se podrían alcanzar estimaciones de edad más antiguas (Hütt et al., 1988). Para el cuarzo, por ejemplo, con una tasa de radiación natural ( $DR$ ) media en depósitos arenosos de 1 o 1.5Gy/a, este límite de edad queda restringido a 100-200ka, mientras que para feldespatos el límite de edad puede llegar hasta 1Ma o más (Buylaert et al., 2012). Por ejemplo, en Galicia los valores de la  $DR$  varían entre 2 y 6 Gy/ka, saturando generalmente cuando la estimación de la  $De$  alcanza valores entre 100 y 200Gy (Sanjurjo-Sánchez y Vidal-Román, 2013).

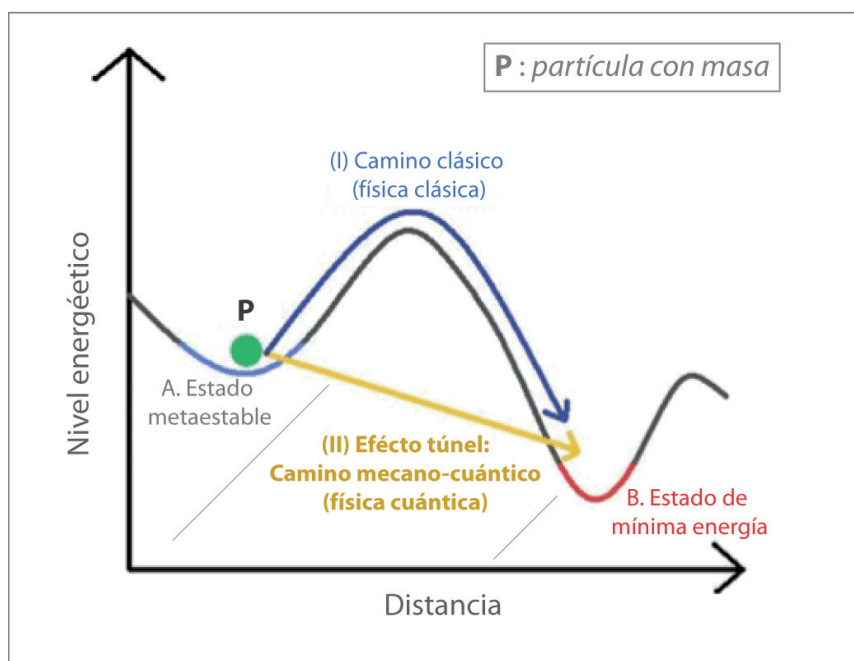
Otras características de los feldespatos, a diferencia del cuarzo, hacen referencia a que la incertidumbre asociada a fenómenos de transferencia térmica de cargas (*thermal transfer*) suele ser menor y/o poco significativa (Huntley and Lamothe, 2001), o que su señal de luminiscencia es blanqueada por la luz del sol más lentamente (Godfrey-Smith et al., 1988) por lo que, para muestras antiguas con una  $De$  elevada y con una posible carga residual debido a blanqueamiento incompleto, existe una alta probabilidad de saturación de la señal IRSL. También es preciso tener en cuenta, a efectos de dosimetría, que el feldespato potásico ( $KAlSi_3O_8$ ), empleado en el presente trabajo para obtener la señal PIR-IRSL, presenta auto-irradiación debido principalmente a la fracción de potasio-40 que forma parte de su red cristalina (Mejdahl, 1987; Huntley and Baril, 1997; Huntley and Hancock, 2001), influyendo así en la estimación de  $DR$ . Además, para regenerar la señal IRSL, propia de los feldespatos, se precisan tamaños de dosis mayores que pueden venir acompañadas de una mayor incertidumbre, si bien, el mayor inconveniente es el fenómeno de atenuación anómala (*anomalous fading*) de la misma, observado por Wintle (1973) por primera vez, y que se explica a continuación.

### 6.1. Atenuación anómala de la señal IRSL (*anomalous fading*)

La atenuación anómala es un fenómeno que presentan los feldespatos en el que, trampas que son térmicamente estables, sufren una pérdida parcial de cargas y, por lo tanto, una pérdida parcial de la señal IRSL (Thomsen, 2008). El término “anómalo” es debido a que esta atenuación o pérdida parcial de la señal IRSL se produce en zonas de la curva de respuesta asociadas a trampas profundas, muy estables y capaces de albergar electrones durante millones de años pero que, sorprendentemente, en un breve periodo de tiempo pierden algunas de las cargas atrapadas en ellas. Así, una alícuota de una muestra dada que permanece almacenada en el laboratorio durante unos días podría presentar una señal atenuada respecto a otra de la misma muestra y cuya señal se ha analizado inmediatamente, por lo que este fenómeno tiene como consecuencia una señal natural de luminiscencia IRSL menos intensa a la que realmente le correspondería en

función de la radiación natural recibida, dando lugar a una infra-estimación de la  $De$  y, por lo tanto, del rango de edad obtenido (Aitken, 1985; 1998).

La explicación más aceptada para justificar este fenómeno de atenuación anómala es el efecto túnel o “*quantum mechanical tunnelling*” (Aitken, 1985). El efecto túnel fue citado en 1928 por Georgiy Antonovich Gamov, como posible causante de la atenuación observada en las partículas alfa. Explicado a partir de los principios de la mecánica cuántica, es un fenómeno en donde una partícula puede atravesar una barrera que es superior a su propia energía cinética, por lo que este tipo de movimiento de cargas no se explica mediante las leyes de la física clásica (Razavy, 2003) (Fig. 6.1). En el campo de la datación mediante luminiscencia, será M.J. Aitken (1985) quien aplique estos conocimientos, proponiendo que los electrones no escapan de las trampas por vibraciones -térmicas o de otra índole- vía banda de conducción, sino mediante vibraciones generadas por ondas mecánicas que favorecen el movimiento de electrones por este efecto túnel. Es por ello por lo que este fenómeno se considere atómico, ya que, experimentalmente, un incremento de la temperatura no supone una mayor pérdida de electrones desde trampas IRSL y su consiguiente pérdida de señal.



**Figura 6.1.** Esquema simplificado de la trayectoria de una partícula de masa (P) desde un nivel energético meta-estable (A), hasta un nivel de energía mínimo (B) atravesando una barrera mediante el camino clásico (I) explicado por la física clásica, o explicado por el camino mecano-cuántico por efecto túnel (II).

Respecto al factor tiempo, el número de electrones que se pierden es proporcional al logaritmo del tiempo transcurrido durante el almacenaje, por lo que la cantidad de señal que se pierde es igual de 1 a 10 unidades de tiempo que de 10 a 100, de 100 a 1000, etcétera; la atenuación y el tiempo siguen relación logarítmica al menos a escala de tiempo humana y cuantificar esta pérdida a escala geológica es un aspecto controvertido (Visocekas et al., 1976; Huntley et al., 1985). Así, en el transcurso de un corto periodo de tiempo, como puede ser el de almacenamiento de la muestra o desde que llega al laboratorio hasta el análisis de su señal de luminiscencia, algunos electrones atrapados penetran, por efecto túnel, hasta receptores de cargas o centros de recombinación próximos (Spooner, 1994b; Aitken, 1998) lo que se traduce como una reducción o pérdida de señal IRSL ya que estas recombinaciones no serán ya detectadas en el posterior análisis de luminiscencia.

## 6.2. Modelos físicos propuestos para la señal IRSL.

En base a los experimentos realizados se han desarrollado diversos modelos físicos, predominando la idea de una sola trampa involucrada para explicar el fenómeno de atenuación en feldespatos si bien, en otros modelos se sugiere la contribución de dos o más tipos de trampas. En este apartado se citarán algunas de las propuestas de forma simplificada ya que estos aspectos físicos, como el comportamiento de las cargas dentro de la red cristalina de los minerales, sobrepasa el propósito del presente trabajo.

### 6.2.1. Modelos de trampa única y múltiple.

Para la señal IRSL, y siguiendo un criterio cronológico, Hütt (1998) propone un modelo de trampa única (*single trap type*) con asistencia térmica. Así, en un primer momento, un estímulo infrarrojo (IR) llevaría hacia un estado de excitación a las cargas atrapadas en este tipo de trampa única para que, en un segundo paso y mediante un estímulo térmico, se produzca el paso de estas cargas en estado de excitación hacia la banda de conducción para su posterior recombinación. No obstante, para algunos investigadores, la energía de activación térmica para esta señal sería insuficiente.

Posteriormente, Poolton (1995b; 2002a,b) establece una relación entre la energía de activación térmica y la frecuencia de la vibración de la red cristalina, sugiriendo la combinación de dos procesos para que se genere la señal IRSL para feldespatos: en el primero, por efecto túnel, los electrones se mueven desde un estado de excitación en sus trampas IRSL hasta centros de recombinación activos y en el segundo hay transferencia de electrones desde un estado de excitación desde las trampas IRSL hacia determinadas zonas caracterizadas por una baja movilidad, denominadas estados de cola de banda, y ubicadas debajo de la banda de conducción (*low-movility band-tail states*). Para el efecto túnel no resultaría necesario asistencia térmica y su probabilidad de recombinación disminuiría con la distancia entre donante y receptor de cargas (trampa de electrones y centro de recombinación o par electrón-hueco). Para el segundo proceso involucrado, esto es, el paso desde un estado de baja movilidad -debajo de la banda de conducción- hacia otros de mayor excitación, para poder

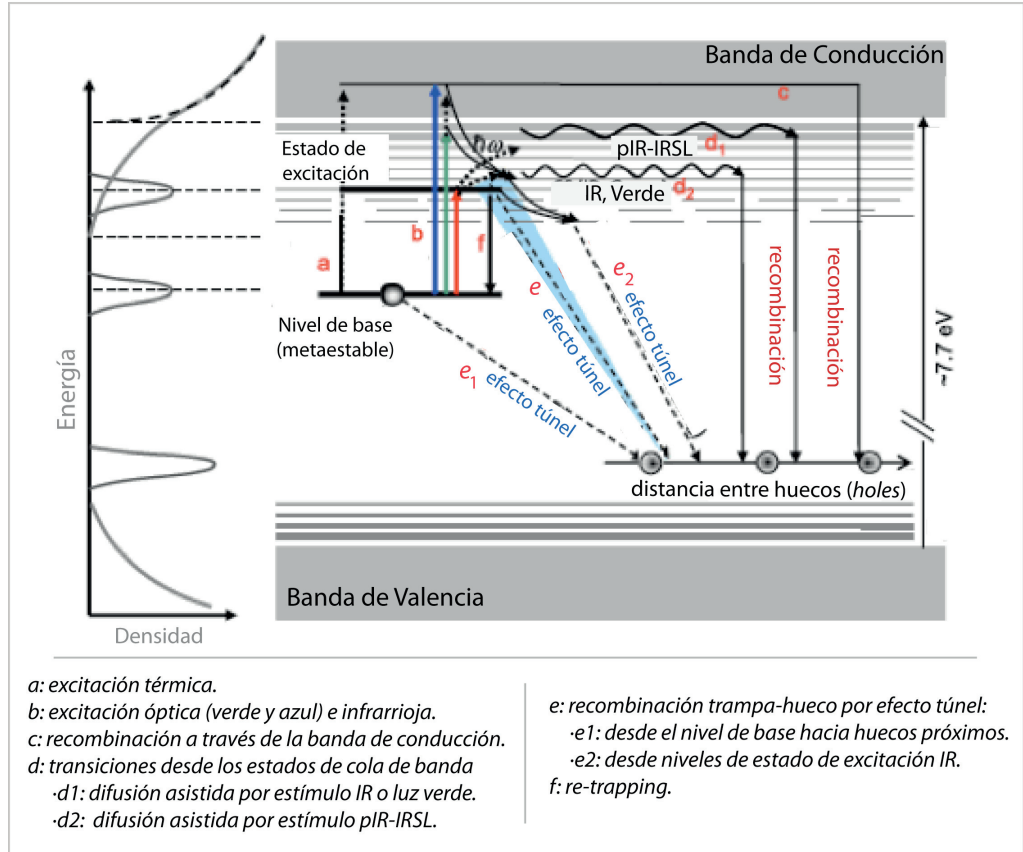
pasar así a los centros de recombinación, si se precisaría asistencia térmica. El desarrollo de este modelo propuesto es la base de la variante del protocolo SAR a alta temperatura desarrollado posteriormente por Thomsen (2008), en el que, mediante un primer estímulo IR a baja temperatura ( $IR_{50}$ ) se fuerza la recombinación de pares poco distantes por efecto túnel, eliminando así las trampas más susceptibles de atenuación (*anomalous fading*), aplicando, seguidamente, un estímulo IRSL a alta temperatura ( $IR_{225}$ ) que provocaría la recombinación de las cargas (entre pares trampa-hueco) más distantes, presumiblemente más estables y con menos tasa de atenuación. Los subíndices 50 y 225 hacen referencia a grados centígrados.

#### 6.2.2. Señal IRSL y modelo de bandas de estados energéticos (*band-tail states*).

El hecho de obtener una señal más estable y con una atenuación mucho menor utilizando un estímulo IRSL a alta temperatura se puede explicar en base al modelo desarrollado para la luminiscencia de feldespatos llamado modelo de bandas (*band model*) (Poolton, 2002a-b, 2009; Thomsen et al., 2008; Jain and Ankjærgaard, 2011). En éste modelo de bandas se propone la existencia de señales de distinta estabilidad para feldespatos y que implica una recombinación de cargas entre el pares (trampa-hueco) a través de distintas bandas correspondientes a diferentes estados energéticos (*band-tail states*), variando la movilidad de los electrones atrapados en las trampas -de un mismo tipo- dispuestas a lo largo de estas. Esta disposición en bandas que se plantea discurre desde zonas de alta densidad de cargas -como trampas con electrones en estado de excitación cerca de la banda de conducción- hacia zonas de menor densidad, baja excitación y baja movilidad, más próximas a la banda prohibida (*forbidden gap*) (Fig. 6.2).

El origen de la señal pIR-IRSL estable, según este modelo de bandas incluye tres fases: (I) Efecto túnel en naturaleza (*ground state tunnelling in nature*) en donde se producen transporte y pérdida de cargas por efecto túnel desde un nivel de base fundamental (Fig. 6.2; (e1) y que deriva en recombinación de cargas entre pares trampa-hueco durante el periodo de enterramiento y cuya probabilidad decrece exponencialmente con la distancia entre ambos (Aitken, 1985). (II) Un primer estímulo  $IR_{50}$  provocaría el paso de los electrones en trampas desde un estado fundamental hasta un estado de excitación (*excited state*) pudiendo recombinar los pares de cargas trampa-hueco y emitir señal IRSL debido a la propagación de ondas mecánicas por efecto túnel (*extended electron wave-function*) (Poolton, 2002a; 2002b). Este estímulo a baja temperatura estimularía la recombinación de aquellas trampas susceptibles de atenuación en el laboratorio por efecto túnel (*IRSL laboratory tunnelling*) (Fig. 6.2; (e2 y d2)). (III) Posteriormente, una vez eliminadas las cargas de las trampas susceptibles de atenuación en laboratorio mediante el estímulo  $IR_{50}$  a baja temperatura, se aplica un posterior estímulo  $IR_{50}$  a alta temperatura capaz de excitar aquellos electrones que permanecen dentro de niveles de energía elevados (*high energy states*) pudiendo así acceder a su par (su hueco o centro de recombinación activado) para recombinar y producir una señal IRSL a alta temperatura o pIR-IRSL (*post IR-IRSL*). Esta será más estable debido a su mayor distancia entre los pares, disminuyendo enormemente la probabilidad de

recombinación por efecto túnel y con ello la atenuación de la señal de la señal (Fig. 6.2;(d1)) (Jain and Ankjærgaard, 2011).



**Figura 6.2.** Modelo simplificado de las transiciones en la zona de cola de bandas y recombinación por efecto túnel en feldespatos como hipotéticos causantes de la atenuación de la señal IRSL (Tomado de Jain and Ankjærgaard, 2011).

Así, en base al modelo de bandas de trampa única, un aumento de la temperatura del primer estímulo IRSL - analizando un rango de temperaturas entre 50 y 260°C- facilita térmicamente la probabilidad de recombinación por efecto túnel y vaciado de estas trampas menos estables y susceptibles de atenuación. El posterior estímulo IRSL a alta temperatura (pIR-IRSL) aumenta la probabilidad de recombinación de aquellas trampas más profundas y que se suponen más estables o con menor grado de atenuación por efecto túnel. A efectos de estabilidad de la señal IRSL, no se observan grandes variaciones entre ambos estímulos térmicos. No obstante, sí se produce una señal IRSL más tenue a medida que se incrementa la temperatura del primer

estímulo térmico por lo que se recomienda que éste sea lo más bajo posible, por ejemplo 50°C, para generar la señal  $IRSL_{50}$  y evitar así los problemas asociados al análisis de señales poco intensas (Buylaert et al., 2012; Kars et al., 2014).

A modo de referencia y sin ahondar más en aspectos teóricos, se citarán también los estudios realizados para analizar el límite superior de temperatura de *pre-heat* y empleados para aislar la señal IRSL de feldespatos más estable a escala geológica (Bøtter-Jensen et al., 2003; Duller and Bøtter-Jensen, 1993; Duller, 1994; Kars et al., 2014).

### 6.3. Protocolo SAR modificado para feldespato y la señal pIR-IRSL.

El análisis de la señal IRSL a alta temperatura sugerido por Thomsen (2008), en donde se aplicaba un primer estímulo ( $IR_{50}$ ) elimina los pares trampa-hueco más inestables y con mayor tasa de atenuación, seguido de un estímulo a alta temperatura (pIR-IRSL<sub>225</sub>) a partir del cual se mide la señal emitida por recombinación de pares de cargas más lejanos, más estables y con menor probabilidad de atenuación, fue testado posteriormente por Buylaert (2009) y desarrollado más tarde por Thiel (2011), en base al estudio con feldespato potásico de grano grueso llevado a cabo por Murray (2009), y en el cual se establece una temperatura de *pre-heat* de 320°C/60s, obteniéndose buenos resultados a efectos de reciclaje, recuperación y adecuación del protocolo (*Dose recovery test*). En el protocolo SAR modificado para extraer la señal pIR-IRSL, se establece una temperatura para el estímulo IR a alta temperatura de 290°C para forzar la recombinación de pares más distantes donde se espera una señal más estable tanto para feldespatos de grano grueso como para fracción fina, alcanzando niveles de saturación mayores y, por lo tanto, edades más antiguas. Se establece, entonces, que la señal pIR-IRSL<sub>290</sub> no sufre atenuación en su estado natural- aunque en laboratorio se aprecian valores de atenuación entre un 1% y 1,5% por década (Aitken, 1985; Auclair et al., 2003).

Este protocolo SAR modificado comienza con una irradiación beta (la primera dosis será de 0 Gy para extraer la señal natural), seguido de un *pre-heat* de 320°C durante 60s, un estímulo IR a 50°C ( $IR_{50}$ ) durante 200s -a modo de barrido de pares de cargas cercanas susceptibles de atenuación- y, después, un estímulo IR a 290°C durante 200s (pIR-IRSL<sub>290</sub>) a partir del cual se extraerá la señal IRSL, empleada en las estimaciones. En el siguiente paso se realiza la corrección de esta señal a partir de un *Test-dose* del mismo modo que se ejecutó el protocolo para las señales anteriores, pero la dosis inducida de normalización, esto es, radiación beta para el *test-dose* ( $D_{Tx}$ ) ; *pre-heat* de 320°C/60s;  $IR_{50}$ /200s; pIR-IRSL<sub>290</sub>/200s, incluyendo un último paso a modo de blanqueamiento total de la señal con un estímulo IR a 325°C durante 100s (Murray and Wintle, 2003).

## 6.4. Test de atenuación y modelo de corrección.

El cálculo de la atenuación, aún empleando una señal pIR-IRSL, permite estimar de la cantidad de señal que se pierde para poder efectuar posteriormente las correcciones pertinentes en las dataciones. Estas correcciones se pueden llevar a cabo mediante el modelo corrección de atenuación por efecto túnel en la región lineal de la curva de crecimiento de Huntley and Lamothe (2001), que fue desarrollado por Auclair (2003) incluyendo las aproximaciones realizadas por Aitken (1985), y también desarrollado más adelante por el propio Huntley (2006). No obstante, el modelo de corrección empleado en el presente trabajo es el modelo experimental desarrollado por Visocekas (2002) en el que se enfrentan la señal de las sucesivas mediciones realizadas en un test de atenuación (*fading test*) y el logaritmo del tiempo. En el test de atenuación se registran las señales IRSL y pIR-IRSL regeneradas a una misma dosis, pero medidas a tiempos variables: la primera señal se mide inmediatamente después de regenerar la señal, y el resto de señales se medirán sucesivamente a intervalos de tiempo mayores simulando retardos o tiempos de almacenamiento más prolongados y analizando la pérdida de señal a lo largo de los mismos. Así, a modo de cuantificar la tasa de atenuación, se emplea un gráfico semi-logarítmico con la señal IRSL y pIR-IRSL obtenida en cada medición, expresada en porcentaje.

## 6.5. Radiación interna en feldespato potásico.

La radiación interna que afecta a los granos de feldespato potásico procede principalmente en forma de radiación beta por desintegración del isótopo radiactivo  $^{40}\text{K}$  (Mejdahl and Winther-Nielsen, 1982) y en menor medida de los isótopos radiactivos de Rb, U y Th -el cuarzo se suele considerar a inerte a este efecto. El  $^{40}\text{K}$  se desintegra dentro de la propia red cristalina del mineral y reduce el efecto de la radiación gamma procedente del medio (radiación gamma externa). De forma generalizada, el contenido en potasio en los granos gruesos de feldespato alcalino se estima en valores entre un 10 y 13% (Spooner, 1992), y su contribución a la *DR* interna se estima en un 14% aproximadamente (Huntley and Baril, 1997).

La estimación de la radiación beta interna para grano grueso de feldespato potásico se calcula siguiendo el modelo desarrollado por Aitken (1985) según el cual un grano está incluido en un fragmento de material y este, a su vez, en una matriz que se asume homogénea (*infinite matrix assumption*). Cuantitativamente, en este modelo se estima que la dosis beta ( $D_{\text{BETA}}$ ) propia del grano sería de 8.3mGy/a y la del fragmento de 1.55mGy/a. Como la auto-irradiación por  $^{40}\text{K}$  atenúa la radiación que incide desde la matriz, el valor final estimado para ésta última es de un 34%, por lo que el promedio de la radiación beta del fragmento incluido en la matriz supondrá un 100-34%. Además, y siguiendo con el mismo modelo, la radiación beta emitida por las cadenas de desintegración de uranio y torio en el interior del fragmento también sufre una atenuación debido a esta auto-irradiación, reduciéndose hasta un 62%, lo que supone que a la estimación de la componente beta externa de la *DR* se le aplique un factor de corrección determinado por la expresión  $D_{\text{BETA-EXTERNA}} = X * 0.62$ , siendo *X* la actividad beta total de las cadenas de uranio y torio, en Gy/ka.



Respecto a las partículas beta que emite el Rubidio ( $^{87}\text{Rb}$ ), su contribución externa se considera insignificante debido a su baja energía. No obstante, su radiación interna, más significativa, se estima en proporción a la concentración de potasio, asumiéndose un ratio K/Rb de aproximadamente 200:1 (Aitken, 1998) que equivaldría, para tamaños de granos entre 0.01 y 0.03mm, a un ratio para la  $DR$  de 3.4/1 (Mejdahl, 1987). Así, se estima una  $DR_{\text{BETA}}$  interna de un 1% equivalente a 4.68Gy/ka (Nambi and Aitken, 1986) pudiendo llegar hasta un 30% de la contribución total del potasio. Por otra parte, aunque la radiación alfa para grano grueso tratado con fluorhídrico puede suponer un 1% de la  $DR$  ( $\alpha\text{-value}=0.01$ ), para grano fino poli-mineral resulta ser la componente más importante de auto-irradiación debido a su alta energía (Mejdahl, 1987). En este último caso, se aplica el “valor- $\alpha$ ” de la radiación alfa efectiva estimado mediante coeficientes (Rees-Jones, 1995) y que para la fracción fina poli-mineral se estima en  $0.08\pm0.02$ .

## 6.6. Bibliografía.

Aitken M.J. (1985) Thermoluminescence dating. Academic, London. 359pp.

Aitken M.J. (1998) An Introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press. 267pp.

Auclair, M.; Lamothe, M.; Huot, S. (2003) Measurement of anomalous fading for feldspar IRSL using SAR. *Radiation Measurements* 37, 487–492.

Bailiff, I.K.; Barnett, S.M. (1994) Characteristics of infrared-stimulated luminescence from a feldspar at low temperature. *Radiation Measurements* 23, 541–545.

Bailiff, I.K.; Poolton, N.R.J. (1989) Charge transfer in quartz and feldspar: factors affecting the dating of young sediments. In: Long and Short Range Limits in Luminescence Dating Occasional publication No. 9. Research Laboratory for Archaeology and History of Art, Oxford.

Bailiff, I.K.; Poolton, N.R.J. (1991) Studies of charge transfer mechanisms in feldspars. *Nuclear Tracks Radiation Measurements* 18, 111–118.

Bøtter-Jensen, L.; Andersen, C.E.; Duller, G.A.T.; Murray, A.S. (2003) Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. *Radiation Measurements* 37, 535–541.

Buylaert, J.-P.; Murray, A.S.; Thomsen, K.J.; Jain, M. (2009) Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar. *Radiation Measurements* 44, 560–565.

Buylaert, J.-P.; Jain, M.; Murray, A.S.; Thomsen, K.J.; Thiel, C.; Sohbat, R. (2012) A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas* 41, 435–451

Clark, R.J.; Sanderson, S.W.S. (1994) Photostimulated luminescence excitation spectroscopy of feldspars and micas. *Radiation Measurements* 24, 641–646.

Duller, G.A.T.; Wintle, A.G. (1991) On infrared stimulated luminescence at elevated temperatures. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 18, 379–384.

Duller, G.A.T.; Bøtter-Jensen, L. (1993) Luminescence from potassium feldspars stimulated by infrared and green light. *Radiation Protection Dosimetry* 47, 683–688.

Duller, G.A.T. (1994) A new method for the analysis of infrared stimulated luminescence from potassium feldspars. *Radiation Measurements* 23, 281–285

Godfrey-Smith, D.I.; Huntley, D.J. and Chen, W.-H (1988) Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews* 7, 373–380.

Huntley, D. J.; Godfrey-Smith, D. I.; Thewalt, M. L. W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature* 313, 105–107.

Huntley, D.J.; Baril, M.R. (1997) The K content of K-feldspars being measured in optical dating or in thermoluminescence dating. *Ancient TL* 15, 11–13.

Huntley, D.J.; Hancock, R.G.V. (2001) The Rb contents of the K-feldspar grains being measured in optical dating. *Ancient TL* 19, 43–46.

Huntley, D.J. and Lamothe, M. (2001) Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Canadian Journal of Earth Science* 38, 1093–1106.

Huntley, D. J.; Godfrey-Smith, D. I.; Thewalt, M. L. W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature* 313, 105–107.

Hütt, G.; Jaek, I.; Tchonka, J. (1988) Optical dating: K-feldspars optical response stimulation spectra. *Quaternary Science Reviews* 7, 381–385.

Kars, R.H.; Reimann, T.; Wallinga, J. (2014) Are feldspar SAR protocols appropriate for post-IR IRSL dating? *Quaternary Geochronology* 22, 126–136.

Jain, M.; Singhvi, A.K. (2001) Limits to depletion of blue-green light stimulated luminescence in feldspars:

implications for quartz dating. *Radiation Measurements* 33, 883–892.

Jain, M. and Ankjærgaard, C. (2011) Towards a non-fading signal in feldspar: insight into charge transport and tunnelling from time-resolved optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 46, 292–309.

Li, B. and Li, S.-H. (2011) Thermal stability of infrared stimulated luminescence of sedimentary K-feldspar. *Radiation Measurements* 46, 29–36.

Li, B. and Li, S.-H. (2011) The effect of band-tail states on the thermal stability of the infrared stimulated luminescence from K-feldspar. *Journal of Luminescence*, 136, 5–10.

McKeever, S.W.S.; Bøtter-Jensen, L.; Larsen, N.A.; Duller, G.A.T. (1997) Temperature dependence on OSL decay curves: experimental and theoretical aspects. *Radiation Measurements* 27, 161–170.

Mejdahl, V. and Winther-Nielsen, M. (1982) TL dating based on feldspar inclusions. *PACT* 6, 426–437.

Mejdahl, V. (1987) Internal radiactivity in Quartz and feldspar grains. *Ancient TL* 5, 10–17.

Murray, A.S.; Buylaert, J.P.; Thomsen, K.J.; Jain, M. (2009) The effect of preheating on the IRSL signal from feldspar. *Radiation Measurements* 44, 554–559.

Nambi, K.S.V. and Aitken, M.J. (1986) Annual dose conversion factors for TL and ESR dating. *Archaeometry* 28, 202–205.

Poolton, N.R.J.; Bøtter-Jensen, L.; Johnsen, O. (1995b) Thermo-optical properties of optically stimulated luminescence in feldspars. *Radiation Measurements* 24, 531–534.

Poolton, N.R.J.; Ozanyan, K.B.; Wallinga, J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L. (2002a) Electrons in feldspar II: a consideration of the influence of conduction band-tail states on luminescence processes. *Physics and Chemistry Minerals* 29, 217–225.

Poolton, N.R.J.; Wallinga, J.; Murray, A.S.; Bulur, E.; Bøtter-Jensen, L. (2002b) Electrons in feldspar I: on the wave function of electrons trapped at simple lattice defects. *Physics and Chemistry Minerals* 29, 210–216.

Razavy, M. (2003) *Quantum Theory of Tunneling*. World Scientific.

Rees-Jones, J. (1995) Dating young sediments using fine grained quartz. *Ancient TL* 13, 9–14.

Sanjurjo-Sánchez, J. y Vidal Romaní, J.R. (2013) Problemas y nuevos procedimientos de datación por OSL para los sedimentos litorales del NO de la Península Ibérica. VII Jornadas de Geomorfología Litoral, Oviedo, España. *Geotemas* 14, 47–50.

Spooner, N.A. (1992) Optical dating: preliminary results on the anomalous fading of luminescence from feldspars. *Quaternary Science Reviews* 11, 139–145.

Spooner, N.A. (1994a) On the optical dating signal from quartz. *Radiation Measurements* 23, 593–600

Spooner, N.A. (1994b) The anomalous fading of infrared-stimulated luminescence from feldspars. *Radiation Measurements* 23, 625–632.

Thiel, C.; Buylaert, J.-P.; Murray, A.; Terhorst, B.; Hofer, I.; Tsukamoto, S.; Frenchen, M. (2011) Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) – Testing the potential of an elevated temperature post-IR IRSL protocol. *Quaternary International* 234, 23–31.

Thomsen, K.J., Murray, A.S., Jain, M., Bøtter-Jensen, L. (2008) Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts. *Radiation Measurements* 43, 1474e1486.

Visocekas, R.; Ceva, T.; Marti, C.; Lefaucheux, F.; Robert, M.C. (1976) Tunnelling processes in afterglow of calcite. *Physica Status Solidi* 35, 315–327.

Visocekas, R. (2002) Tunnelling in afterglow, its coexistence and interweaving with thermally stimulated luminescence. *Radiat. Prot. Dosim.* 100, 45–54.

Wintle, A.G., 1973. Anomalous fading of thermoluminescence in mineral samples. *Nature* 245, 143–144.

Capítulo 7.

Material y métodos.



## 7. Material y métodos.

### 7.1. Trabajo de campo.

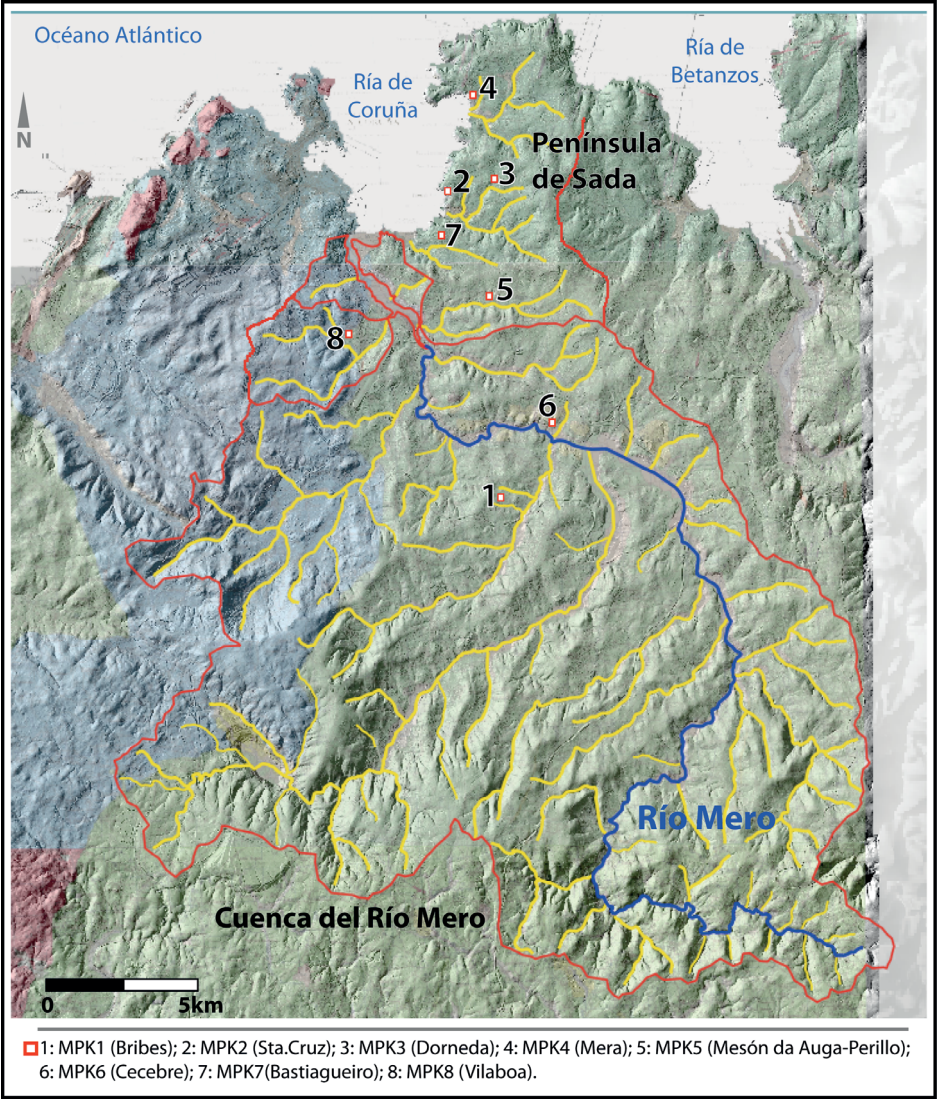
En el siguiente apartado se describirán algunos de los aspectos más relevantes de los muestreos realizados en la cuenca del río Mero y la península de Sada (muestras MPK), de las muestras tomadas en la desembocadura del río Ulla a la altura de la localidad de Catoira (muestras ABC), todas ellas correspondientes a depósitos fluviales, así como de las muestras representativas de la serie eólica a lo largo de la fachada atlántica gallega en Punta Langosteira (Langosteria), Punta Mortaza (Mortaza2), en Corme, en Xalfas, en Tal, en Bornalle, y en las Islas Cíes, en Alto da Figueira (CAF1, CAF2, CAF3) y Lagoa dos Nenos (CLN1).

#### 7.1.1. Muestras MPK: Cuenca del río Mero y península de Sada.

A partir de algunos de los depósitos fluviales ubicados en la cuenca del Río Mero y Península de Sada (A Coruña; Galicia; NO de la Península Ibérica) se extrajeron las muestras MPK (MPK1, MPK2, MPK3, MPK4, MPK5, MPK7 y MPK8), entre octubre de 2013 y octubre del 2014 (Fig. 7.1).

Como se ha comentado en la introducción, muchos de los depósitos citados en la bibliografía previa (Nonn, 1966; Vidal-Romaní, 1977) han sido destruidos, debido principalmente a la urbanización del territorio y a la utilización de estos materiales para áridos de construcción o pavimentación de vías de comunicación. En numerosas ocasiones, la búsqueda de algunos de estos depósitos ha resultado en vano, imposibilitando el muestreo, si bien, la mayoría de estos depósitos que permanecían ocultos bajo la densa vegetación han aflorado al abrir nuevas vías de circulación o debido a la realización de trabajos de construcción civil, viviendas o cantería. A modo de anécdota, la muestra MPK7 se extrajo momentos antes de que el camión hormigonera realizara el relleno del hueco de cimentación excavado sobre el propio depósito correspondiente (Fig. 7.2).

Cabe añadir que para la localización de los lugares de muestreo, tomas de muestras y mediciones de radiación gamma “*in situ*” se emplearon los automóviles privados de los directores de la presente tesis doctoral, el doctor D. Jorge Sanjurjo Sánchez y el catedrático D. Juan Ramón Vidal Romaní, ofreciendo, incluso en este ámbito, una ayuda inestimable, aspecto que se suma a las explicaciones de índole geomorfológica y/o genética de los propios depósitos durante el trabajo de campo, o aquellas relacionadas con la optimización del muestreo respecto a aquellos materiales como granos de cuarzo y feldespato de los que se obtendrá la señal de luminiscencia OSL o pIR-IRSL - y que se explicarán posteriormente en la metodología de muestreo para luminiscencia.



**Figura 7.1.** Relieve de la cuenca del río Mero y península de Sada, con su cauce principal y afluentes, e indicando las muestras extraídas en la misma para su datación. La litología está representada con colores verdes para el esquisto y el azul y rojo para granitoides al igual que en la figura 2.2; (hojas 21, 22, 45, 46, 70 y 71 del IGME-MAGNA 50 y MDT05-IGME; Augas de Galicia: georreferencia de cauces y cuenca del río Mero; NASA: modelo digital del terreno (DEM) SRTM90-34 (Jarvis et al., 2008).





**Figura 7.2.** Construcción civil sobre el depósito fluvial de Bastiagueiro (muestra MPK7).

La muestra de Bribes (MPK1) se localiza y extrae el 10 de Octubre del 2013, en un talud de carretera (DP-0102; Km:1) próxima a la localidad de Bribes (Concello de Cambre) ( $43^{\circ}16'33.70''\text{N}$ ;  $8^{\circ}18'46.05''\text{O}$ ), correspondiendo a un depósito de terraza del río Brexa con cuarcitas y material cuarzoso muy mezclado, desarrollado sobre un sustrato esquistoso muy alterado. La altura del perfil es de unos 3m, realizándose el muestreo a 1m de altura - es decir a 2m del techo del depósito (Fig. 7.3). La terraza se sitúa en una cota absoluta de +50m snma y una cota relativa respecto al cauce actual (río Brexa) de +28m snma. Posteriormente, el 23 de Octubre del 2013 se realiza un recorrido de identificación de depósitos en Perillo, Mera y Santa Cruz y el día 30 del mismo mes se realiza una tercera salida en la cual se extraen las muestras MPK2 (Santa Cruz), MPK3 (Dorneda) y MPK4 (Mera). La muestra MPK2 se extrae de un depósito que supera los 10m de espesor, desarrollándose sobre un sustrato esquistoso alterado que se eleva unos 14m snma, en las inmediaciones costeras del pueblo de Santa Cruz ( $43^{\circ}22'51''\text{N}$ ;  $8^{\circ}20'18''\text{O}$ ). El muestreo se realiza a 1.5m de la base de un talud de unos 5m de altura y conformado por el propio depósito, presentando gran compactación y humedad (Fig. 7.4). El depósito del cual se extrae la muestra MPK3 en Dorneda ( $43^{\circ}21'26''\text{N}$ ;  $8^{\circ}19'52''\text{O}$ ) tiene una potencia de 2.5m (Fig. 7.5) y se



desarrolla también sobre un sustrato esquistoso alterado, a una cota absoluta es de unos +56m snma y a una cota relativa de +47m respecto al cauce actual (Rego da Loba).



**Figura 7.3.** Depósito de Bribes (MPK1) con el testigo de acero introducido en una zona homogénea con predominio de partículas de tamaño arena, y de la cual se ha quitado la capa más superficial (5cm aprox.).





**Figura 7.4.** Medición de radiación gamma *in-situ* en el hueco dejado por el testigo de acero para la muestra de Sta.Cruz (MPK2).





**Figura 7.5.** Depósito de Dorneda (nuestra MPK3) antes de la extracción del testigo.



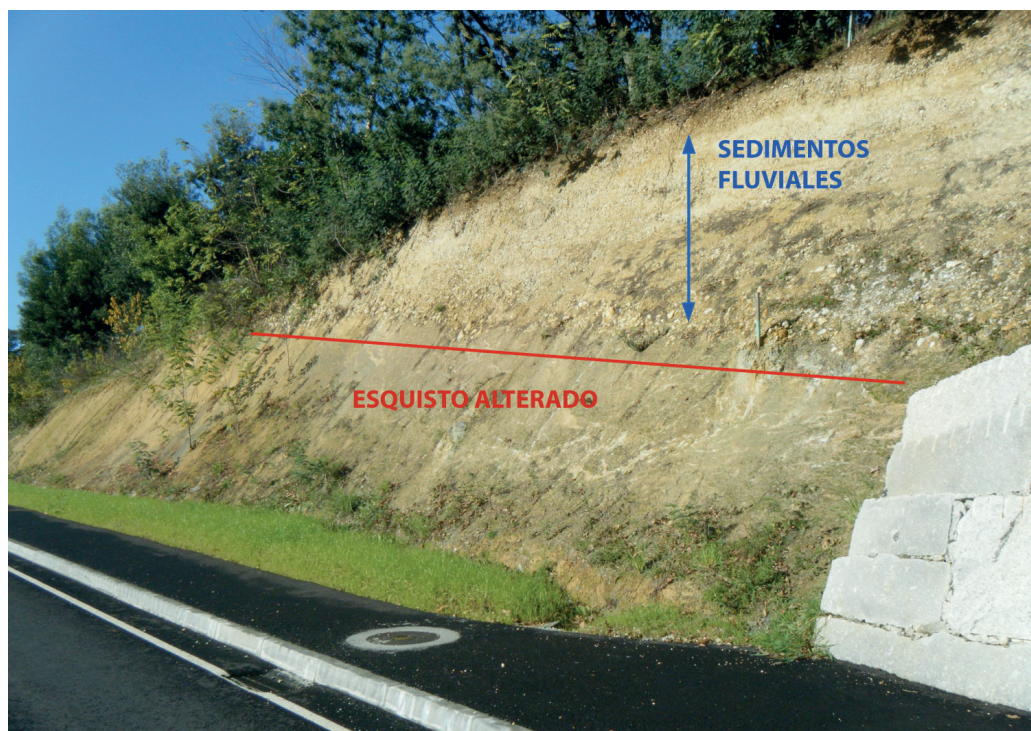
Por último, la muestra de Mera (MPK4) (Fig. 7.6) ha sido extraída en un talud junto al paseo marítimo de Mera ( $43^{\circ} 21' 4''$  N;  $8^{\circ} 20' 51''$  O) situado a +6m snma, a partir de un depósito el cual ha sido desmantelado parcialmente por la construcción de viviendas y cubierto con césped.



**Figura 7.6.** Extracción de la muestra MPK4 en el depósito de Mera.

El 22 de Noviembre del 2013 se realiza la cuarta expedición y se localiza y extrae la muestra de Mesón-Perillo (MPK5) en un talud de N-VI a la altura del Km-589 (Avda. das Mariñas- Concello de Oleiros; 43° 19' 27''N; 8° 20' 18''O). Este depósito de unos 10m de potencia está situado a +50m snma, y una cota relativa de +8m respecto al cauce Rego de San Pedro, desarrollándose sobre un sustrato esquistoso muy alterado (Fig. 7.7).

La muestra MPK7 se extrae el 3 de Septiembre 2014 en Bastiagueiro (Concello de Oleiros; 43° 20' 27''N; 8° 20' 57''O), en un solar en actual proceso de cimentación (Fig. 7.8). El depósito presenta una potencia de aproximadamente 4m, la cota absoluta se sitúa a +41m snma y la cota relativa de +36m, respecto al Rego de Bastiagueiro. Posteriormente, el 7 de Octubre del 2014 se extrae la muestra de Vilaboa (MPK8) en un solar en la carretera de Vilaboa- A Zapateira (43° 18' 45''N; 8° 23' 01''O) en la localidad de Rutis (Concello de Culleredo). Este depósito se desarrolla sobre esquistos alterados, aunque sus sedimentos proceden de la zona granítica (granodioritas) y tiene un espesor de 2m, una cota absoluta de +39m snma y una cota relativa de +10m respecto al Río Trabe (Rego do Castro). El muestreo se realiza a un metro de la superficie del perfil (Fig. 7.9).



**Figura 7.7.** Imagen del depósito de Mesón da Auga-Perillo (MPK5) en el talud de la carretera nacional N-VI, y en la cual se indica el límite entre la litología (esquistos alterados) y el depósito datado (sedimentos fluviales).





**Figura 7.8.** Hueco de cimentación sobre el depósito de Bastiagueiro (MPK7).



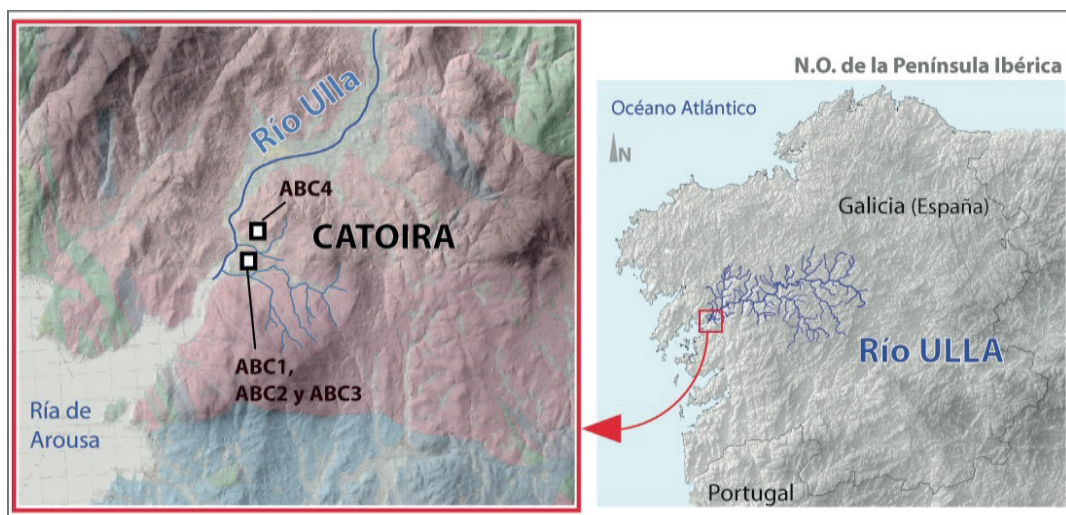


**Figura 7.9.** Muestra MPK8 (Vilaboa).

La extracción de la muestra MPK6 de Cecebre ( $43^{\circ} 17' 29''\text{N}$ ;  $8^{\circ} 18' 37''\text{O}$ ) se realizó en el año 2011 en un hueco de cantera a +50m smna y a una cota relativa de +30m sobre el cauce actual del río Mero.

## 7.1.2. Localización y muestreo de los depósitos fluviales del río Ulla.

El muestreo de los depósitos fluviales desarrollados en la desembocadura del río Ulla a la altura de la localidad de Catoira (provincia de Pontevedra; Galicia; NO de la Península Ibérica) (Fig.7.10) y correspondientes a las muestras ABC1, ABC2, ABC3 y ABC4, se realizó en el año 2010 a partir de la información cedida por Dña. Alicia López Regueiro, del departamento de Biología e Xeoloxía do Instituto de Ensinanza Secundaria de Teis (Vigo; Galicia) y que entre los años 1998 y 2004 fueron recavando datos y localizando estos afloramientos.



**Figura 7.10.** Mapa de situación del río Ulla y afluentes (NO Península Ibérica) y de las muestras ABC1, ABC2, ABC3 y ABC4, en la localidad de Catoira (Pontevedra; Galicia; España). Mapa de relieve realizado con QSIG (izq.: MDT05-IGME y hojas 120 y 152 del Mapa Geológico del IGME; dcha.: DEM srtm90-34 cgiar-CSI-NASA y datos vectoriales de la cuenca del río Ulla de Augas de Galicia).

Las muestras ABC1, ABC2 y ABC3 se extrajeron a partir de un mismo afloramiento de unos 4m de potencia localizado en Borreiros, en el Concello de Catoira ( $42^{\circ}40'25''N$ ;  $8^{\circ}43'20''O$ ), a +40m snma. En la Figura (Fig. 7.11) se puede observar un esquema del perfil transversal en el cual se disponen distintos cuerpos sedimentarios relacionados con diferentes eventos de deposición del Río Ulla. La muestra ABC1 (Fig. 7.12) está tomada a unos 300cm, de techo a muro, la muestra ABC2 (Fig. 7.13) a 200cm y la muestra ABC3 (Fig. 7.14) a 70cm.



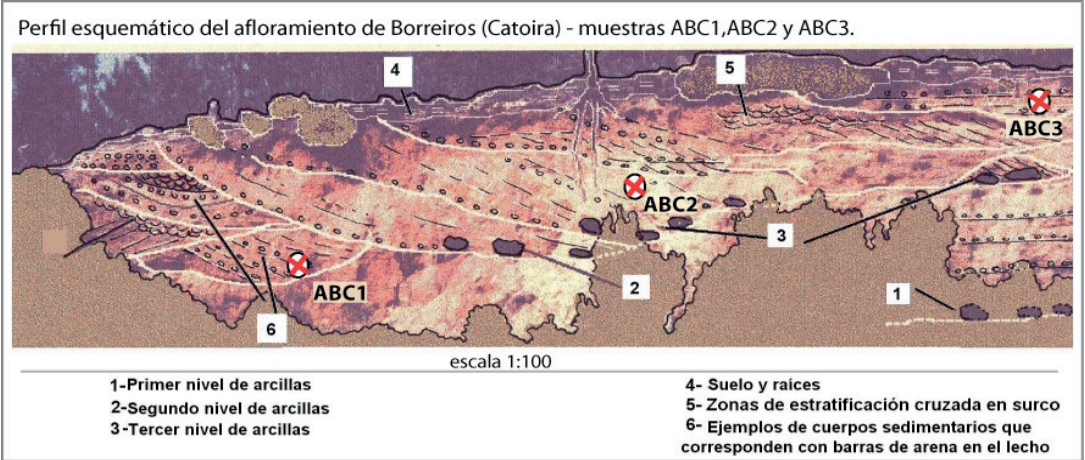


Figura 7.11. Esquema modificado del afloramiento situado en la localidad de Borreiros (Catoira, Pontevedra) (cortesía de Dña. Alicia López Regueiro) y del cual se extrajeron las muestras ABC1, ABC2 y ABC3.



Figura 7.12. Depósito de Borreiros en Catoira (Pontevedra; Galicia).





**Figura 7.13.** El Dr. Sanjurjo-Sánchez y el Catedrático Vidal-Romaní realizando la extracción de la muestra ABC1 en Borreiros (Catoira).



**Figura 7.14.** Extracción de la muestra ABC3 en Borreiros (Catoira).

La muestra ABC4, se extrajo de un depósito de unos 3m de potencia (Fig. 7.15), localizado en Santa Eulalia, en el Concello de Catoira ( $42^{\circ}41'03''\text{N}$ ;  $8^{\circ}43'0''\text{O}$ ) a +20m snma y del Río Ulla.



**Figura 7.15.** Depósito de Santa Eulalia (Catoira) de donde se extrajo la muestra ABC4.



### 7.1.3. Muestras correspondientes a la Serie Eólica de la fachada atlántica gallega.

El conjunto de muestras correspondientes a los depósitos eólico-costeros extraídos en el litoral de la provincia de A Coruña (Galicia; NO de la Península Ibérica) y datados en el presente trabajo han sido extraídas en diferentes momentos. Así, las muestras de Mortaza2, Corme, Xalfas, Tal y Bornalle fueron extraídas, a modo de bloques, en el año 2006 por el catedrático D. Juan Ramón Vidal Romaní y la licenciada Dña. Leticia Gutiérrez Becker. Posteriormente, las muestras de Langosteira, CAF1, CAF2, CAF3 y CLN1 fueron extraídas mediante un testigo de acero por el catedrático D. Juan Ramón Vidal Romaní y el doctor D. Jorge Sanjurjo Sánchez en el año 2011.

El depósito eólico correspondiente a la muestra Langosteira se sitúa en Punta Langosteira (WGS84: 43°21'36''N; 8°29'27''O) a unos 5m (snma) en un promontorio costero conformado por pequeños acantilados en donde se ubica el Puerto Exterior de A Coruña, entre las poblaciones de A Coruña y Arteixo (Fig. 7.16). Es un afloramiento que llega a alcanzar los 9m (snma) con un nivel eólico, entre los 5 y 9m que descansa sobre un depósito de derrubios de unos 2m de espesor, apoyado sobre un nivel marino de conglomerados bien cementados (Gutiérrez-Becker, 2008).

La muestra Mortaza2 (WGS84: 43°18'23''N; 8°38'56''O) pertenece a un afloramiento situado a unos 14m (snma), en Punta Mortaza, entre la localidad de Caión y la playa de Baldaio (A Coruña, Galicia) (Fig. 7.17), conformado por un nivel eólico de arenas compactadas que fosilizan un nivel marino.

El depósito de Corme (WGS84: 43°15'45''N; 8°58'04''O) se sitúa en la Ría de Corme y Laxe a unos 12m (snma), en un pequeño entrante costero con pequeños acantilados (Fig. 7.18). Este pertenece a depósito eólico intercalado ente dos depósitos de vertiente ricos en materia orgánica (para el nivel superior se obtiene un rango de edad mediante  $^{14}\text{C}$  de  $22\pm 0.3\text{ka(BP)}$  y descansa, todo él, sobre una playa de cantos (Gutiérrez-Becker, 2008).

La muestra Xalfas (WGS84: 42°45'43''N 9°06'26''O) se ubica en la boca de la Ría de Muros, en su vertiente Norte, entre las localidades de Louro y Lariño (Concello de Muros; A Coruña; Galicia) (Fig.7.19), situado a unos 45-50m (snma) y conformado por pequeños retazos de depósito de menos de 1m de espesor. No presenta, por tanto, un afloramiento continuo y, sin embargo, este nivel de arenas bien compactadas fosiliza un nivel marino de cantos rodados (Gutiérrez-Becker, 2008).



**Figura 7.16.** Arriba: Imagen satelital (Google Earth) de Punta Langosteira en donde se encuentra localizada con un recuadro rojo la muestra (m) Langosteira. Abajo: Fotografía de la zona de muestreo sobre acantilado (Cortesía de Juan Ramón Vidal Romaní y Jorge Sanjurjo Sánchez).





**Figura 7.17.** Detalle del depósito eólico de Mortaza2 (Cortesía de D. Juan Ramón Vidal Romani). En el recuadro interno se representa la imagen satelital (Google Earth) de Punta Mortaza en donde se encuentra localizada con un recuadro rojo la muestra (m) Mortaza-2.



**Figura 7.18.** Arriba (izq.): Imagen satelital (Google Earth) de la Ría de Corme y Laxe en donde se encuentra localizada con un recuadro rojo la muestra (m) de Corme. Arriba (dcha) Detalle del nivel eólico fósil. Abajo: Afloramiento de Corme indicando los niveles orgánicos (MO), el depósito eólico fosilizado (E) y la playa de cantos subyacente (PC) (Cortesía de Juan Ramón Vidal Romani).

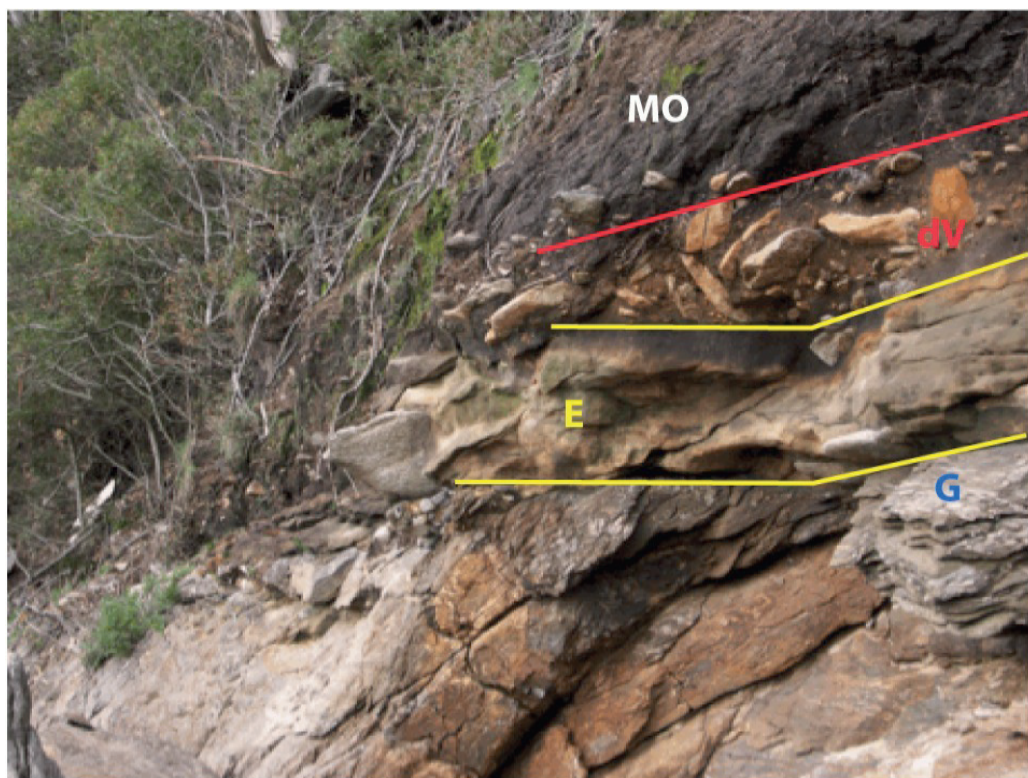




**Figura 7.19.** Arriba: Imagen satelital (Google Earth) de la boca de Ría de Muros en donde se encuentran indicadas con un recuadro rojo las muestras (m) de Xalfas, Bornalle y Tal. Abajo: Detalle del dos bloques pertenecientes al depósito de Xalfas (Cortesía de Juan Ramón Vidal Romani).

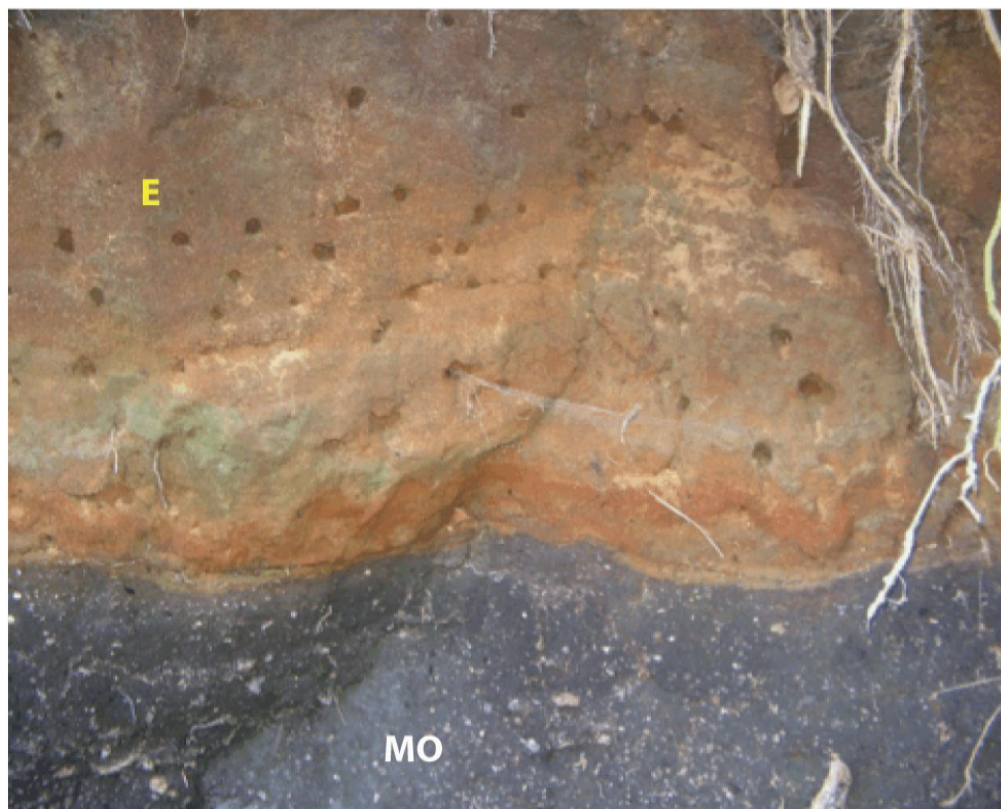


Las muestras Bornalle (WGS84: 42°47'47''N; 9°00'42''O) y Tal (WGS84: 42°47'16''N; 9°00'55''O), también representadas en la imagen satelital precedente (Fig. 7.19- imagen superior), pertenecen a dos depósitos distintos situados en un pequeño entrante en el interior de la Ría de Muros entre las localidades de Bornalle y Tal (A Coruña, Galicia), a unos 2m (snma). El afloramiento de Bornalle (Fig. 7.20) presenta un nivel marino a 1.5m (snma) conformado por cantos redondeados de cuarzo y granito que es fosilizado a 2m (snma) por un nivel eólico sobre el cual descansa un depósito de vertiente a más de 3m, rico en materia orgánica y datado mediante 14C en 22.3+/-0.3ka(BP) (Gutiérrez-Becker, 2008).



**Fig. 7.20. Bornalle:** Depósito arenosos (E) sobre zócalo rocoso granítico (G) de donde se extrajo la muestra Bornalle. Por encima del nivel eólico se puede observar un depósito de vertiente (dV) y un nivel orgánico (MO) (cortesía de D.Juan Ramón Vidal Romani).

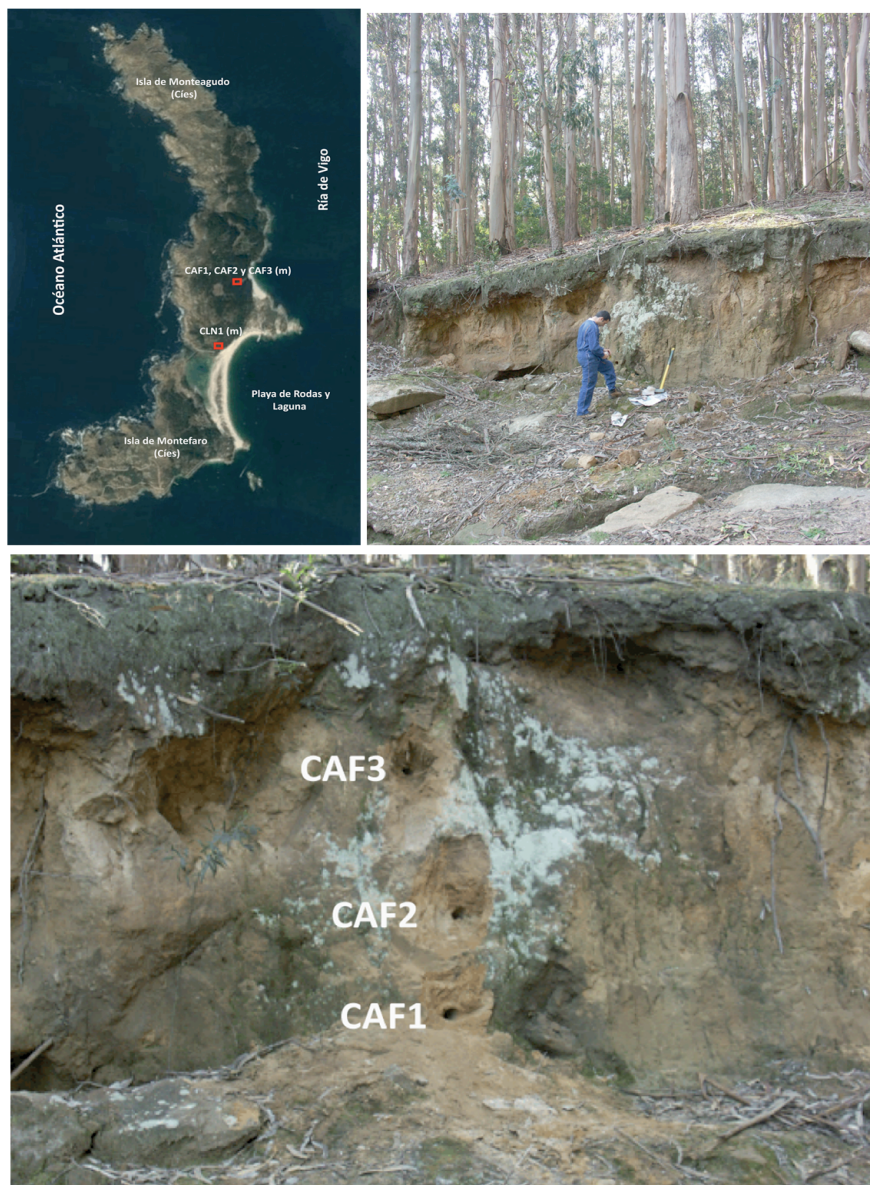
Por su parte, en el afloramiento de Tal (Fig. 7.21), de unos 5m de potencia, el nivel eólico conformado por arenas consolidadas entre 3 y 5m (snma) se asienta sobre un depósito orgánico (asociado a un lagún de tipo continental) datado mediante 14C en  $24.06 \pm 0.36$ ka(BP), que descansa, a su vez, sobre un nivel marino conformado por cantos rodados a menos de 1m (snma) (Gutiérrez-Becker, 2008).



**Figura 7.21:** Imagen del depósito de arenas consolidadas (E) del cual se extrajo la muestra Tal sobre un nivel orgánico (MO) asociado a un depósito lagunar continental y en el cual se observan los (micro)pliegues o estructuras de carga en el contacto entre ambos niveles (Cortesía de D.Juan Ramón Vidal Romani).

Las muestras CAF1, CAF2 y CAF3 y CLN1 fueron extraídas el 12/03/2012 en el archipiélago de las Islas Cíes, situadas en la fachada atlántica, en la boca de la Ría de Vigo (Pontevedra; Galicia). Las tres primeras pertenecen a un mismo depósito próximo al Alto da Figueira y situado a uno 55m (snma) (WGS84:  $42^{\circ}13'45''$ N -  $8^{\circ}54'15''$ O) desarrollado sobre granito alterado. La muestra CAF1 tiene una profundidad de 200cm, CAF2 de 145cm y CAF3 de 80cm (Fig. 7.22). La muestra CLN1, por su parte, se sitúa próxima a Lagoa dos Nenos a unos 6m (snma) en, extrayéndose el testigo a 100cm del techo del depósito (WGS84:  $42^{\circ}13'29''$ N -  $8^{\circ}54'17''$ O).





**Figura 7.22.** Arriba (izq.): Imagen satelital (Google Earth) de las Islas de Monteagudo y Montefaro, pertenecientes al archipiélago de las Islas Cíes en donde se encuentran indicadas con un recuadro rojo las muestras (m) de CAF1, CAF2, CAF3 y CLN1; Arriba (dcha.): Reconocimiento de la zona de muestreo Alto da Figueira por parte del Dr. Jorge Sanjurjo Sánchez. Abajo: Fotografía del perfil longitudinal del depósito próximo al Alto da Figueira del cual se obtuvieron, de abajo a arriba, las muestras CAF1, CAF2 y CAF3 (Cortesía de D. Juan Ramón Vidal Romani y D. Jorge Sanjurjo Sánchez).

## 7.2. Metodología para la extracción de muestras.

El primer paso para la obtención de las muestras es seleccionar visualmente una zona del depósito que sea lo más homogénea posible y en la cual predominen, preferiblemente, partículas del tamaño de las arenas y finos ( $<1000\mu\text{m}$ ) y evitando, en medida de lo posible, la presencia de materiales de mayor tamaño como gravas, cantos o clastos de mayor tamaño que puedan afectar a una tasa de radiación ( $DR$ ) homogénea, entre otros aspectos. Una vez seleccionada la zona más idónea en donde introducir el testigo, se limpia el área seleccionada – por ejemplo con una pala- desechando los 5cm más superficiales a lo largo de un radio aproximado de 20 o 30cm desde el punto concreto de introducción del testigo (Fig. 7.23).

La obtención de los testigos consiste en la introducción de cilindros de acero de 1cm de grosor, una luz de 10cm de diámetro y 30cm de longitud, de forma perpendicular al perfil vertical y ayudándose con una maza de acero. Una vez extraído, se cubren los extremos con bolsas de plástico y cinta, para evitar la exposición a la luz, así como el movimiento o la pérdida de material durante su transporte, señalizando con un rotulador permanente la parte interna y externa del testigo y el nombre de la muestra (Fig. 7.24). Antes de tapar el hueco generado por el testigo, se procede a la medición de la radiación ionizante natural dentro del mismo con el espectrómetro gamma portátil (Fig. 7.25). Además, del interior propio hueco se extraen aproximadamente 500g de muestra para espectrometría gamma de alta resolución, que se conservarán en una bolsa hermética con su etiquetado correspondiente.

Respecto a las muestras Mortaza1 y Mortaza2, Corme, Xalfas, Bornalle y Tal, pertenecientes a la serie eólica y muestreada en el 2006, se extrajeron bloques de unos 50cm de lado (Fig. 7.26), envueltos posteriormente en plástico opaco. Una vez en laboratorio, se separa con una pequeña maza y un cincel entre 5 y 10cm del material más externo de cada cara el cual será empleado para medición de humedad, saturación y espectrometría gamma. Parte del núcleo interno del bloque se utilizará para extraer y purificar el cuarzo y feldespato a partir de los cuales se extraerá la señal de luminiscencia OSL o pIR-IRSL correspondiente, almacenando la muestra sobrante.



**Figura 7.23.** Selección y limpieza de una zona homogénea de muestreo, rica en arenas y limos, correspondiente a la muestra de Bastiagueiro (MPK7; arriba) y de Catoira (ABC4; abajo).





**Figura 7.24.** Introducción testigo acero (arriba) y sellado del mismo (debajo), para evitar movimiento de material en su interior y pérdida de humedad.



**Figura 7.25.** Medición de espectrometría gamma “*in situ*” en el propio hueco del testigo, una vez extraído este.



**Figura 7.26.** Imagen de los bloques extraídos de la muestra de Tal (cortesía de Juan Ramón Vidal Romani)



### 7.3 Métodos físicos y químicos para extracción y purificación de cuarzo.

#### 7.3.1. Tamizado y contenido en agua de las muestras

Para la manipulación de los testigos en laboratorio es imprescindible trabajar en condiciones de seguridad lumínica evitando cualquier contacto de la muestra con luz natural. La longitud de onda de las fuentes de luz artificial también afecta a las muestras a excepción de las correspondientes al rojo o naranja, empleando en el proceso de datación este tipo de iluminación. En el laboratorio de Luminiscencia de la Unidad de Geo-cronología de los Servicios de Apoyo a la Investigación UDC, se emplean *LEDs* naranja (Fig. 7.27).



**Figura 7.27.** Laboratorio de procesado de muestras para Luminiscencia OSL/TL/IRSL de la unidad de Geocronología (SAI-UDC).

La extracción del material del interior de los testigos se realiza en condiciones de seguridad lumínica extrayendo la muestra por cada uno de los extremos, teniendo en cuenta que los primeros 5cm correspondientes a la parte exterior e interior del testigo se mezclan y homogeneizan para determinar el contenido en humedad y saturación.

El resto de la muestra, correspondiente a la parte central, será la que se emplee para datar, extendiéndose sobre papel secante para su posterior tamizado, una vez seca a temperatura ambiente.

El tamizado puede realizarse en seco o en húmedo dependiendo de las características de las muestras y las fracciones que se obtienen son las correspondientes a 1000, 700, 500, 355, 250, 180, 125, 90 y 63 $\mu$ m, midiendo su masa y conservándolas en bolsas de plástico en condiciones de total obscuridad con su etiquetado correspondiente. Para la datación mediante OSL e IRSL a partir de granos de cuarzo y feldespato se emplea, a ser posible, la fracción correspondiente a una luz de malla entre 180-250 $\mu$ m ya que, generalmente, es la que mejores condiciones de blanqueamiento presenta para depósitos fluviales, entre otros aspectos (Aitken, 1998; Truelsen y Wallinga, 2003). Por otra parte, para la datación IRSL a partir de la fracción fina, la fracción empleada se corresponde con una luz de maya <63 $\mu$ m.

Para el análisis granulométrico de las muestras MPK y ABC se emplearán, siguiendo la escala propuesta por Wenworth (1922), las fracciones extraídas mediante tamizado húmedo correspondientes a las arenas media-gruesa (250-1000 $\mu$ m) y arena gruesa (>1000 $\mu$ m), mientras que la estimación de las fracciones correspondientes a arena fina (125-250 $\mu$ m), arena muy fina (63-125 $\mu$ m), limos (2-63 $\mu$ m) y arcilla (<2 $\mu$ m) se realizan mediante granulometría láser.

### 7.3.2. Purificación de minerales.

#### 7.3.2.1. Purificación de grano grueso de cuarzo.

Una vez separada la fracción deseada (en este caso 180-250 $\mu$ m), se procede a la eliminación de impurezas -como carbonatos u óxidos de hierro- mediante un ataque ácido con clorhídrico (HCl) al 10%, durante 3 horas y a 50°C en placa calefactora. Transcurrido este tiempo, se lava con agua destilada varias veces evitando pérdidas de muestra y de recogiendo el residuo para su posterior tratamiento. Una vez seco en estufa a 45°C, se anota su masa seca y se realiza un ataque oxidativo con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 10%, a temperatura ambiente y hasta se detenga la reacción, si hubiere, momento a partir del cual se procede, de igual modo, al lavado, secado y pesada en seco.

La separación física de los granos de cuarzo se realiza mediante centrifugado en un medio líquido ultra-denso (poli-tungsteno de sodio) a densidad 2.62g/cc, que es la densidad del propio cuarzo. Para 5g de muestra se añaden 15mL de líquido ultra-denso, aproximadamente, y se aplica un centrifugado a 2000rpm durante 2 minutos. Así, el sobrenadante, en donde permanecerá la fracción menos densa correspondiente a los feldespatos, se transvasa a un vaso de precipitados que se lavará de tres a seis veces con agua destilada evitando arrastrar muestra y recuperando, además, el líquido ultra-denso. Por otra parte, en el tubo de centrifuga, en donde permanecen el cuarzo y minerales pesados precipitados, se añade el mismo volumen de líquido ultra-denso pero esta vez a

densidad 2.70g/cc, realizando un segundo centrifugado a 2000rpm durante 2 minutos para separar los granos de cuarzo de los minerales pesados, como zircones, etc. El sobrenadante contendrá el cuarzo y se trasvasará a otro vaso de precipitados, y en el tubo permanecerán precipitados los minerales pesados. En ambos casos se precederá al lavado con agua destilada y recuperación del líquido.

Mediante este método de separación por densidades es frecuente que se arrastren granos de feldespato o la propia presencia de granos de cuarzo con impurezas de feldespato. Así, para obtener cuarzo purificado se procede a un ataque químico con fluorhídrico (HF). Una vez anotado el peso seco inicial, se añaden 15mL de HF al 20% por gramo de cuarzo y  $\text{HNO}_3$  (v/v) durante 30 minutos a 45°C aplicando ultrasonidos. Posteriormente se lava con agua destilada (3 veces), se seca en estufa a 45°C y se anota el peso seco. Este tratamiento con fluorhídrico elimina, además, la capa superficial de los granos de cuarzo que han estado sometidos a radiación natural procedentes de las partículas alfa -de alta intensidad pero con un débil poder de penetración de unas 20µm. También se elimina una fracción de la radiación beta, aproximadamente un 10%, de modo que durante la estimación de la *DR* será necesario corregir este efecto (Aitken, 1998). En este punto, puede resultar conveniente re-tamizar los granos de cuarzo para obtener una fracción 180-250µm lo más homogénea posible, ya que pueden producirse fracturas en los mismos.

Para evaluar la purificación del cuarzo, se realiza una prueba contaminación de feldespato que consiste en la inducción de una dosis con la fuente beta del equipo de luminiscencia sobre un número determinado de alícuotas -conformadas por un número aproximado de 100 granos- y analizando, posteriormente, sus señales OSL e IRSL. Esto es así porque el cuarzo emite solamente señal OSL mientras los feldespatos emiten tanto OSL como IRSL. Así, en ausencia de señal IRSL, la pureza del cuarzo es prácticamente del 100%, considerándose que los granos de cuarzo purificados están preparados para su uso en los protocolos de datación OSL correspondientes. No obstante, si se detecta señal IRSL existe la presencia de feldespatos entre los granos de cuarzo, por lo que se debe repetir el tratamiento con HF (10%) y la prueba de contaminación, las veces que sean oportunas.

#### 7.3.2.2. Purificación de grano grueso de feldespato potásico.

La metodología seguida para la extracción y purificación de grano grueso de feldespato potásico, y siguiendo la técnica de Mejdahl (1982; 1983), es similar al del cuarzo: tamizado y obtención de la fracción 180-250µm; ataque ácido con clorhídrico y peróxido de hidrógeno; centrifugado en medio líquido ultra-denso a 2,58 (g/cc) y extracción de la fracción correspondiente feldespato potásico en el sobrenadante; ataque ácido con HF 10% para eliminar la capa externa susceptible de recibir radiación alfa (puede ser necesario un segundo ataque ácido con HCL para eliminar fluoruros originados por el HF). Como los granos de feldespato se auto-irradian (emitiendo

desde su interior radiación beta y alfa) es importante tener en cuenta el tamaño de grano de esta fracción, a efectos de corrección por atenuación de la radiación beta de la matriz sedimentaria o radiación beta externa ( $DR_{\text{BETA}}$ ) (Aitken, 1985).

#### 7.3.2.3. Extracción de la fracción fina de feldespatos.

Por último, para la extracción del feldespato de la fracción fina de la muestra se procede a la separación de los materiales mediante tamizado húmedo, recogiendo todo el material arrastrado por debajo de la luz de malla correspondiente a  $63\mu\text{m}$ . Las cantidades de agua son considerables por lo que se estimula la evaporación en una estufa entre  $20$  y  $30^\circ\text{C}$ . Una vez seca la fracción fina, y pesada, se realiza un ataque ácido con HCl al 10% durante 30 minutos, con su lavado correspondiente, secado y pesada, seguido de baño en peróxido (10%) durante 5 minutos, con su lavado correspondiente, secado y pesada. A continuación se aplica, a modo de dispersante, oxalato sódico (10%) durante 15 minutos (seguido del lavado, secado y pesada) debido a que esta fracción ( $<63\mu\text{m}$ ) se va a separar en tres fracciones distintas de tamaño de partícula entre  $1$  y  $4\mu\text{m}$ ,  $4$  y  $11\mu\text{m}$ , y por último, entre  $11$  y  $63\mu\text{m}$ , mediante centrifugado. Para ello se combinan ciclos de resuspensión en agitadora y centrifugado cuyos tiempos y velocidades se calculan siguiendo la ley de Stokes (Batchelor, 1967; Lamb, 1994). La fracción de superior tamaño,  $11-63\mu\text{m}$ , precipitará a 500rpm durante 60 segundos, permaneciendo en suspensión el resto de fracciones. En un posterior ciclo de resuspensión y centrifugado, la fracción  $4$  y  $11\mu\text{m}$  precipitará a 500 durante 15 segundos, tiempo tras el cual, permanecerá en el sobrenadante la fracción menor de  $1$  y  $4\mu\text{m}$ . Debido a su (hipotético) mayor contenido en feldespato, se aconseja emplear la fracción  $4-11\mu\text{m}$  para datación, y en su defecto, la fracción  $11-63\mu\text{m}$  (Zimmermann, 1971; French, 1996).

#### 7.4. Humedad y saturación

Para determinar la cantidad de humedad presente en la muestra y la cantidad de agua que retiene el sedimento en estado de saturación, se toma una fracción homogeneizada de la misma, aprovechando la muestra extraída de los extremos del testigo, la cual se desecha para datación.

El porcentaje de humedad se calcula secando unos 100g de muestra recién extraída y pesando la diferencia en húmedo y en seco, a  $50^\circ\text{C}$  en estufa hasta peso constante. Para el cálculo de la saturación por pesadas se emplean unos 50g de muestra que se introducirán en una jeringa a la que se ha colocado un algodón en la boquilla a modo de filtro, de manera que el agua que se echa en la misma pueda salir sin arrastrar muestra al presionar con el émbolo. Una vez saturada la muestra y desalojado el exceso de agua, se apuntando su masa para, posteriormente, realizar un secado en estufa a  $50^\circ\text{C}$  hasta peso constante. El porcentaje de saturación corresponderá al expresión  $W = [(M_{\text{SAT}} - M_{\text{SECO}}) \cdot 100] / M_{\text{SECO}}$ , siendo ( $M_{\text{SAT}}$ ) masa saturada y ( $M_{\text{SECO}}$ ) la masa seca.

### 7.5. Preparación de muestras para espectrometría gamma de alta resolución.

Para la estimación de la tasa de radiación natural terrestre que presenta la muestra se analizan unos 300g de material recogido del interior del hueco que queda al extraer el testigo. Este material, y antes de la estimación de la tasa de radiación natural terrestre mediante espectrometría gamma de alta resolución, se seca en estufa a 105°C entre 24 y 48h hasta peso constante. La diferencia entre masa húmeda y seca permite obtener el dato correspondiente al contenido en agua de la muestra. De forma opcional se puede realizar un tratamiento térmico, también en una mufla, llevando la muestra a 450°C durante 12h para eliminar carbonatos, anotando su masa una vez enfriada la muestra.

Como algunos de los laboratorios que realizan este tipo de análisis recomiendan un tamaño de partícula inferior a 63µm para una mayor eficiencia de la técnica, se procede a la molienda de la muestra calcinada en un molino de bolas de ágata modelo Retsch PM400 (350rpm/10min.) y posterior tamizado (<63µm), repitiendo sucesivamente el proceso hasta obtener un mínimo de 250g de muestra así tratada, para pasar a su sellado y reposo en campana desecadora durante un mínimo de 25 días, tiempo durante el cual, cualquier desequilibrio en la actividad del gas radón y sus isótopos hijo retoman el equilibrio.

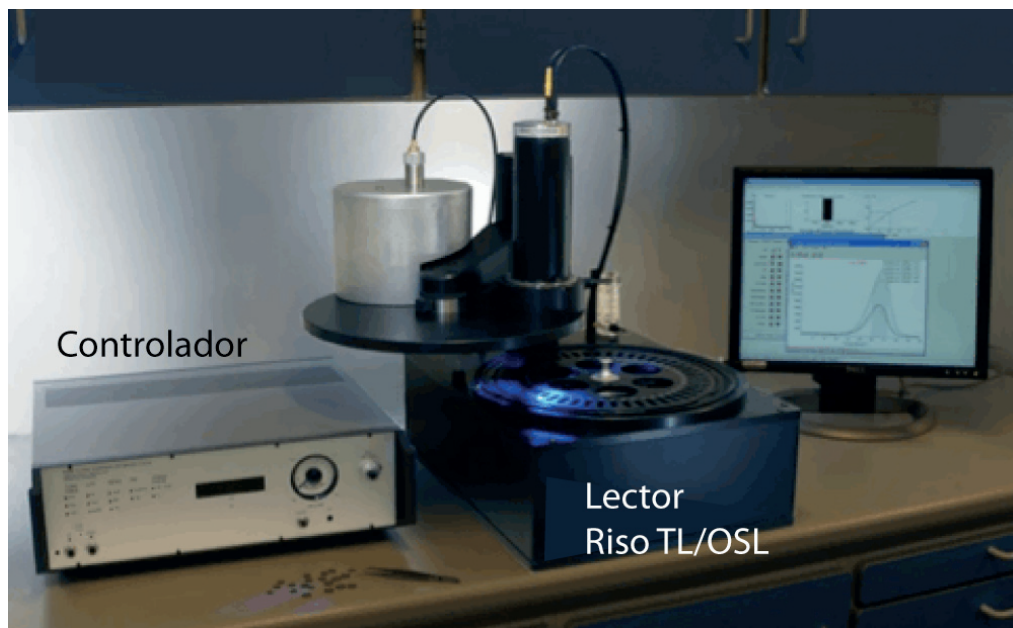
El espectrómetro gamma empleado por el Laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Universidad de A Coruña en la ciudad de Ferrol, así como por la Unidad de Radioisótopos de los Servicios Centrales de Investigación de la Universidad de Sevilla, es un equipo *Camberra XTRA*. En estos laboratorios, para estimar la actividad de los radioisótopos, se tiene en consideración la relación entre la masa calcinada y masa seca, ya que los resultados se refieren a esta última.

### 7.6. Equipo y métodos para Luminiscencia OSL e IRSL

#### 7.6.1. Equipo de luminiscencia y preparación de alícuotas.

El lector Risø TL/OSL es el equipo desarrollado para generar, estimular y registrar una señal de luminiscencia (<http://www.nutech.dtu.dk> ; Bøtter-Jensen et al., 2010). Así, desde un ordenador personal se ejecutan los comandos correspondientes, a través de un controlador o computador de control con todos sus componentes o *hardware* incluido (Fig 7.28). El control de este computador se lleva a cabo, empleando un sistema operativo de *MS Windows*, mediante el programa informático *Control*. La programación y ejecución de los distintos ciclos (*runs*), sets, número de discos y cada uno de los comandos a ejecutar, como dosis inducidas, tratamientos térmicos, estímulos, etcétera, se llevan a cabo, desde el programa de edición *Sequence Editor*. Además, la señal recogida por el tubo foto-multiplicador en forma de cuentas por unidad de tiempo, es digitalizada y procesada

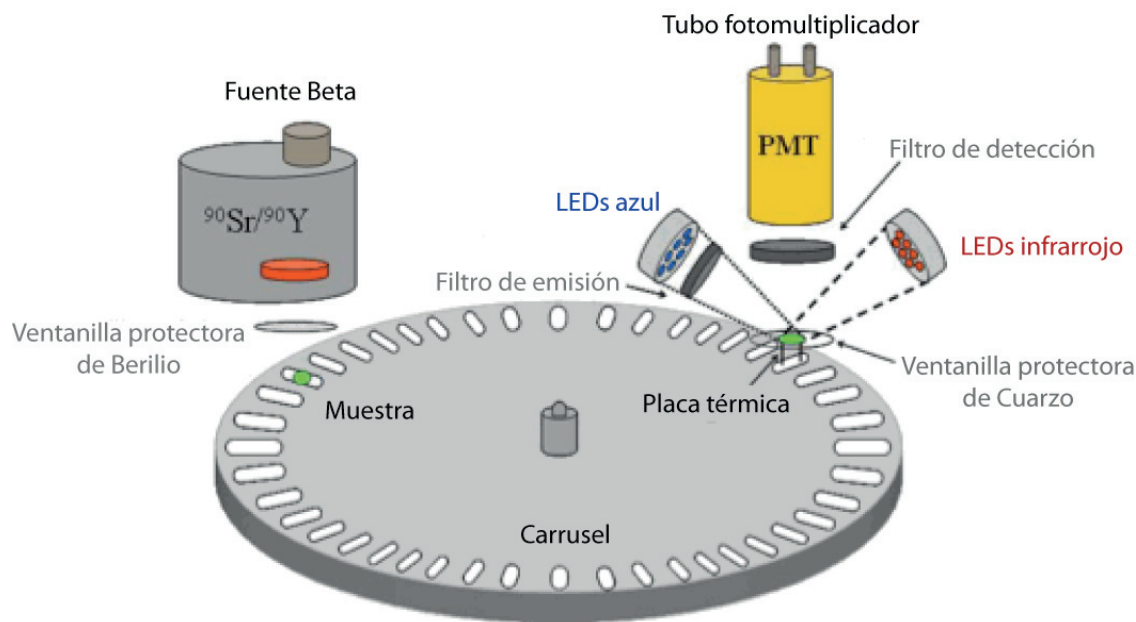
posteriormente mediante el programa *Analyst* (Duller, 2007), ofreciendo datos numéricos con los que se puede operar en una hoja de cálculo (p.ej. *MS Excell*).



**Figura 7.28.** Controlador, lector automático de luminiscencia Risø TL/OSL Modelo DA-20 y PC (DTU Nutech, 2014).

El equipo automático de luminiscencia empleado, el lector Risø TL/OSL DA-15, está equipado con una fuente de estímulo lumínico (óptico o infra-rojo), filtros de emisión y detección para la selección de la longitud de onda deseable, sistema de detección y registro de la señal mediante un tubo foto-multiplicador (*PMT*), una fuente de irradiación beta ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) y una fuente de calor para los diferentes tratamientos térmicos (Fig. 7.29). Así, con un sistema de carrusel preparado con unas celdillas sobre las que se disponen los discos de acero con los granos de mineral, esto es, las alícuotas (Duller, 1995), se van aplicando individualmente cada uno de los pasos que cada protocolo contempla, y que se irán explicando más adelante.





**Figura 7.29.** Esquema simplificado de los componentes del lector de luminiscencia Risø (DTU Nutech, 2014).

Cada alícuota está conformada por una cantidad determinada de granos de mineral de cuarzo o feldespato purificado perteneciente, preferentemente, a la fracción 180-250  $\mu\text{m}$  (Aitken, 1998) y se analizan de manera independientemente bajo las mismas condiciones, para obtener unos datos estadísticamente significativos. Su preparación se realiza sobre una estructura transportable y conformada por dos regletas independientes entre las que se disponen los discos –discos de acero inoxidable monocapa de 9,7mm de diámetro. La regleta inferior, sin perforar, presenta 20 senos o concavidades en los cuales se disponen cada uno de los discos, totalmente limpios. La regleta superior está perforada con 20 orificios idénticos de diámetro determinado (2, 4, 6 y 8mm) que condicionará el tamaño de la alícuota -generalmente, la regleta cuyo orificio tiene 2mm de diámetro corresponde a un tamaño de alícuota de entre 50 y 100 granos de cuarzo perteneciente a la fracción 180-250 $\mu\text{m}$  (valores aproximados; Duller, 2008) siendo, el tamaño de alícuota, un aspecto importante a tener en cuenta para cada muestra (Olley, 1999; Wallinga et al., 2002; Rodnight et al., 2006), máxime para sedimentos fluviales susceptibles de presentar blanqueamiento incompleto y una carga residual en la señal OSL y teniendo en cuenta que entre el 5 y el 10% de alícuotas emitirán señal (Duller, 2000; Jacobs et al., 2003). Esta regleta perforada se coloca encima de la regleta inferior sobre la que descansan los discos de acero y se ajusta manualmente de modo que coincidan los

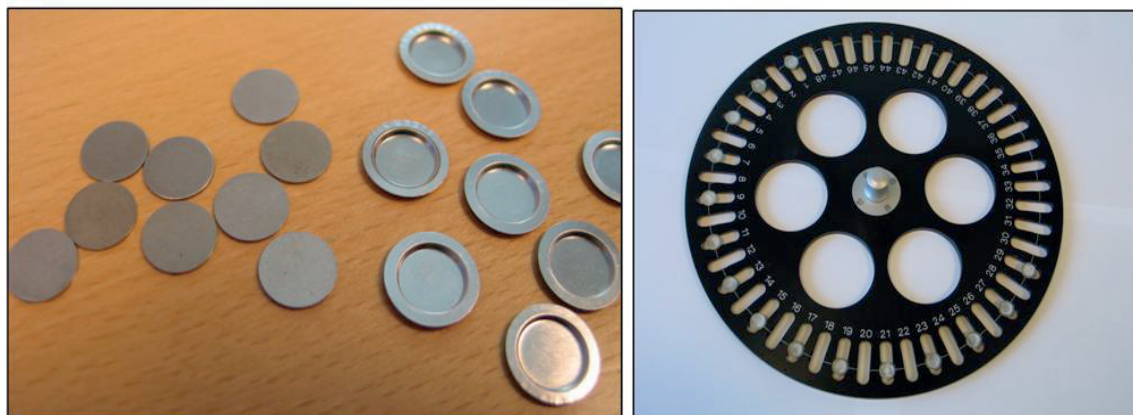
orificios con la zona central de los discos, aplicando finalmente la silicona adhesiva de forma controlada mediante un pulverizador.

Así, una vez pulverizada la silicona, se aparta la regleta superior y, de uno en uno, se van extrayendo los discos depositándolos sobre un pequeño montón de granos de cuarzo o feldespato purificado, dispuestos sobre un recipiente (una placa de Petri pequeña, por ejemplo) de manera que éstos tomen contacto con la cara del disco adherente. Una vez adheridos, se sacude el disco ligeramente con las pinzas para eliminar los granos sueltos y una vez preparada la alícuota, se coloca en una de las 48 celdillas numeradas que presenta el carrusel con el mineral hacia arriba (Fig. 7.30). Por último, aquellos granos sobrantes son recuperados cuidadosamente con un pincel para ser empleados, si fuera necesario, en análisis ulteriores, guardándose con el resto de los granos en condiciones oscuridad. Otra manera de preparar las alícuotas de grano grueso con un tamaño de entre 10 y 30 granos, por ejemplo, requiere del empleo de una micro-cucharilla y una lupa binocular, de modo que los granos se van depositando de uno en uno, y muy cuidadosamente, sobre los discos de acero.

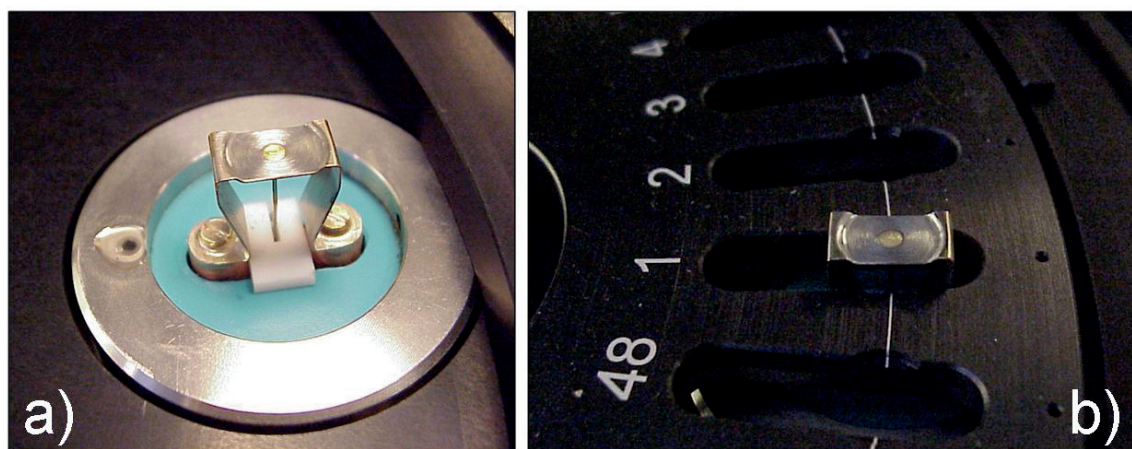
Respecto a la preparación de alícuotas para la fracción fina poli-mineral (4-11 u 11-63 $\mu$ m) para obtener la señal IRSL de los feldespatos contenidos en la misma, los discos de acero se introducen en pocillos (p.ej. de micro-centrifuga) y se vierte suavemente, con una micro-pipeta, 1ml de muestra homogeneizada y resuspendida en etanol (2mg/ml). Cuando el etanol se evapora (al aire o en estufa a 30°C), cada uno de los discos presentan una fina capa de la fracción deseada completamente seca. Con unas pinzas se colocarán en el carrusel del lector de luminiscencia y se aplicará el SAR modificado para feldespatos.

Una vez programados los parámetros para el SAR y puesto en marcha el lector, el primer paso del protocolo que se ejecuta es el tratamiento térmico (*pre-heat*) mediante una fuente de calor diseñada específicamente (Fig. 7.31) y cuyo rango puede oscilar entre la temperatura ambiente y los 700°C.

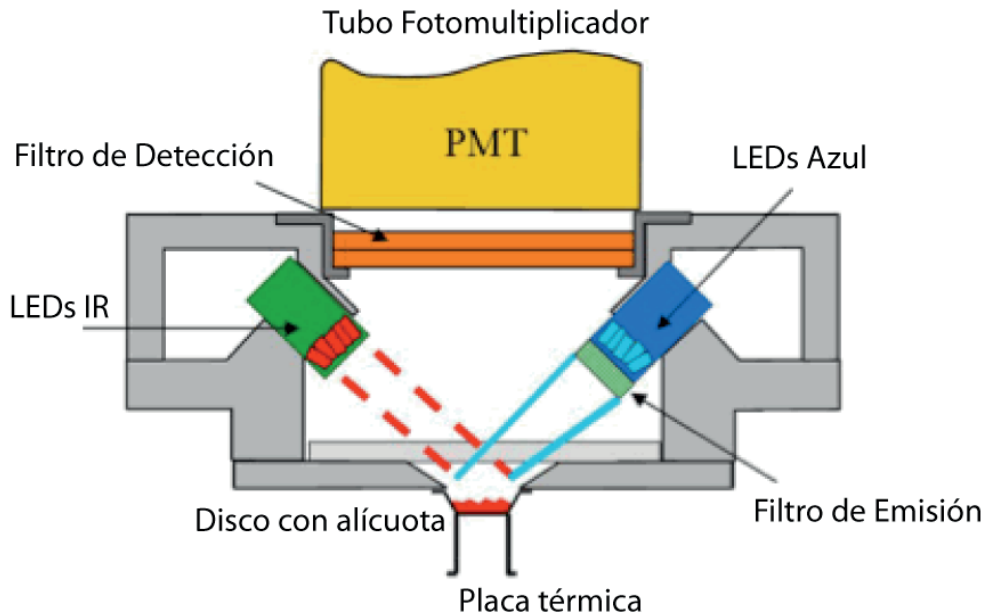
Después del tratamiento térmico se aplica un estímulo óptico, para obtener la señal OSL, empleando LEDs azul y un filtro de emisión (*cut-off filter*) (Fig. 7.32) de longitud de onda de 430 $\pm$ 30nm a 80mW/cm<sup>2</sup>. Para obtener una señal IRSL mediante feldespato se emplea un estímulo mediante LEDs infrarrojo (870nm a 135 mW/cm<sup>2</sup>). El estímulo genera una señal que pasa por un filtro de detección, hacia el tubo foto-multiplicador (PMT bialkali EMI 9235QB). Para OSL, el filtro de detección empleado Hoya U-340, de 7.5mm de grosor y con un pico de transmisión alrededor de los 340nm, que se corresponde a la longitud de onda detectada. La combinación de filtros empleados para IRSL es el Schott BG-39/Cornig 7-59, con una franja de transmisión entre 320 y 480nm (Fig. 7.33).



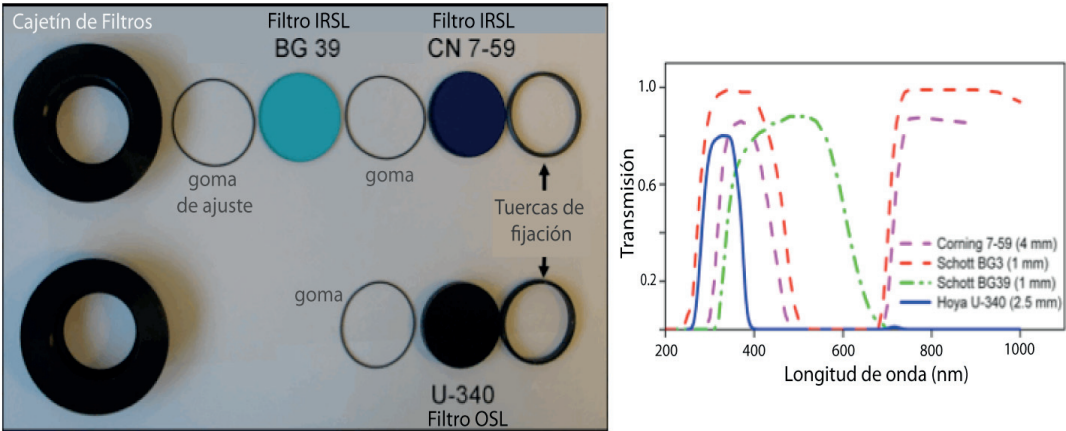
**Figura 7.30.** Discos de acero y carrusel con discos (DTU Nutech, 2014).



**Figura 7.31.** Placa térmica incorporada en el lector Riso. (DTU Nutech, 2014).



**Figura 7.32.** Esquema de los componentes de estímulo de la señal (LEDs azul e infrarrojos (IR), con su filtro de emisión correspondiente) y de los componentes de detección de la señal (filtro de detección y tubo fotomultiplicador (PMT)). También se incluye la posición del disco con la alícuota y la placa térmica subyacente para el tratamiento térmico (Bøtter-Jensen et al., 2010).



**Figura 7.33.** Cajetín de filtros, filtros de detección y longitud de onda de sus zonas de transmisión características (DTU Nutech, 2014). Para OSL se emplea el filtro U-340 y para IRSL se emplea la combinación de filtros BG-39 y CN 7-59.

Por último, la fuente beta ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) empleada para inducir las dosis establecidas a lo largo del SAR emite a razón de  $0,12 \pm 0,003 \text{ Gy/s}$ . La calibración de la fuente se realiza por los propios operarios de los Servicios de Apoyo a Investigación de la UDC. En esta operación que se repite una o dos veces al año, se aplica un SAR sobre cuarzo al que se le ha aplicado una dosis gamma de 5Gy mediante una fuente de  $^{137}\text{Cs}$ , por parte del fabricante (Risø).

#### 7.6.2. Test de contaminación del cuarzo

Para comprobar si el cuarzo se ha purificado completamente se aplica un test de contaminación en donde se compara la señal OSL e IRSL de un número determinado de alícuotas (tres, como mínimo). Para ello se programa una secuencia de un solo ciclo de donde se extraerán las señales correspondientes y que comienza con un tratamiento térmico o *pre-heat* a  $260^\circ\text{C}$  durante 10 segundos (en adelante se especificará temperatura/tiempo) para pasar a aplicar un estímulo infra-rojo ( $50^\circ\text{C}/100\text{s}$ ) que proporcionará la señal IRSL. Posteriormente se aplica el estímulo lumínico con LEDs azul ( $125^\circ\text{C}/100\text{s}$ ) que proporcionará la señal OSL. Para el *test-dose* se aplica una dosis beta de 18Gy, un *cut-heat* ( $260^\circ\text{C}/10\text{s}$ ) y un estímulo IRSL ( $50^\circ\text{C}/100\text{s}$ ) seguido de otro estímulo OSL ( $125^\circ\text{C}/100\text{s}$ ).

Este primer test de contaminación proporciona una señal OSL que sirve de referencia para tantear el tamaño de las alícuotas, la *De* esperada y el tamaño o intensidad de las dosis artificiales para regenerar la señal y construir la curva de crecimiento en los sucesivos test y protocolos como el *pre-heat test*, el protocolo SAR o el *Dose-recovery test*.

#### 7.6.3. Test de tratamiento térmico (*pre-heat test*)

Para observar el comportamiento de las muestras frente a la temperatura, se estudia la respuesta de las alícuotas a tratamientos térmicos variables y para ello se realiza un SAR –que se explicará a continuación– en el cual se aplican distintas temperaturas -dentro de un rango determinado para la señal OSL. Así, al menos tres alícuotas de cada muestra se someterán a cada una de las temperaturas de *pre-heat* establecidas en  $180^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $220^\circ\text{C}$ ,  $240^\circ\text{C}$ ,  $260^\circ\text{C}$  y  $280^\circ\text{C}$  durante 10s, seguido de estímulo OSL ( $125^\circ\text{C}/100\text{s}$ ). Para el *test-dose* se aplica una dosis de 12Gy, *cut-heat* ( $160^\circ\text{C}/10\text{s}$ ) y estímulo OSL ( $125^\circ\text{C}/40\text{s}$ ), terminando cada ciclo con un blanqueo completo de la señal con LEDs azul ( $300^\circ\text{C}/40\text{s}$ ).

7.6.4. Protocolo SAR

En el protocolo SAR (*Single-aliquot Regenerative-dose method*; Murray and Wintle, 2000) cada muestra se divide en un número determinado de alícuotas estadísticamente significativo. Para el presente estudio han sido necesarias un alto número de alícuotas, a veces hasta 200 o más, para obtener un mínimo aceptable de entre 20 y 30 estimaciones de dosis individuales que permitieran aplicar modelos estadísticos para la estimación de la *De* muestral. El número de granos por alícuota –que se ha analizado observando la variabilidad de las estimaciones en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100 y más de 300 granos, etc.; Ver apartado posterior 7.6.7.)- se prepara empleando la regleta de orificio más pequeño (0.2mm) que corresponde a unos 100 granos, aproximadamente.

**Tabla 1.** Pasos que incluye cada ciclo del SAR para extraer la señal de luminiscencia OSL para las muestras MPK y ABC.

<b>Paso 1</b>	Dosis inducida <b>MPK:</b> 0, 42, 96, 216, 0, 96Gy; <b>ABC1 y ABC4:</b> 0, 60, 156, 288, 0, 60Gy; <b>ABC2:</b> 0, 36, 108, 240, 0, 36Gy; <b>ABC3:</b> 0, 144, 288, 408, 0, 144Gy.
<b>Paso 2</b>	<i>Pre-heat</i> (40s) <b>MPK:</b> 260°C; <b>ABC1, ABC2, ABC4:</b> 200°C; <b>ABC3:</b> 220°C.
<b>Paso 3</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal OSL (LEDs azul 470nm; 125°C; 40s)
<b>Paso 4</b>	Dosis inducida para el <i>Test-dose</i> <b>MPK:</b> 18Gy; <b>ABC1 y ABC4:</b> 29Gy; <b>ABC2:</b> 24Gy; <b>ABC3:</b> 36Gy.
<b>Paso 5</b>	<i>Cut-heat</i> (40s) <b>MPK:</b> 240°C; <b>ABC :</b> 160°C;
<b>Paso 6</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal OSL del <i>test-dose</i> (470nm; 125°C; 40s.)
<b>Paso 7</b>	Blanqueado de trampas OSL mediante estímulo luminoso (470nm; 280°C; 40s)



A lo largo del protocolo se realizarán seis ciclos y en cada uno de ellos se obtendrán seis señales normalizadas. Como la señal normalizada se calcula a partir de la señal OSL regenerada ( $L_x$ ) y la señal OSL del test-dose ( $T_x$ ), cada ciclo se divide en tres bloques determinados: (i) regeneración y lectura de señal OSL ( $L_x$ ), (ii) regeneración y lectura de la señal OSL del test-dose ( $T_x$ ) y (iii) blanqueamiento completo de la señal. Esta división en bloques se subdivide a su vez en distintos pasos o *sets*, correspondientes a inducción de dosis, tratamiento térmico y estímulo óptico, como se describe en las tablas (Tabla 1 y 2) para cada una de las muestras de las que se ha extraído la señal OSL.

**Tabla 2.** Pasos que incluye cada ciclo del SAR para extraer la señal de luminiscencia OSL para las muestras eólicas.

<b>Paso 1</b>	Dosis inducida <b>CAF (1,2 y3):</b> 0, 24, 60, 108, 0, 24Gy; <b>Xalfas y TAL:</b> 0, 24, 72, 168, 0, 24Gy. <b>Mortaza2:</b> 0, 24, 60, 120, 0, 24Gy.
<b>Paso 2</b>	<i>Pre-heat</i> (40s) <b>CAF (1,2 y3):</b> 220°C; <b>Xalfas y TAL:</b> 200°C; <b>Mortaza2:</b> 260°C.
<b>Paso 3</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal OSL (LEDs azul 470nm; 125°C; 40s)
<b>Paso 4</b>	Dosis inducida para el <i>test-dose</i> <b>CAF (1,2 y3):</b> 11Gy; <b>Xalfas y TAL:</b> 18Gy; <b>Mortaza2:</b> 12Gy.
<b>Paso 5</b>	<i>Cut-heat</i> (40s) <b>CAF (1,2 y3):</b> 180°C; <b>Xalfas y TAL:</b> 160°C; <b>Mortaza2:</b> 240°C.
<b>Paso 6</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal OSL del <i>test-dose</i> (470nm; 125°C; 40s.)
<b>Paso 7</b>	Blanqueado de trampas OSL mediante estímulo luminoso (470nm; 280°C; 40s)

En el primer bloque, para la regeneración de la señal OSL ( $L_x$ ) se aplican dosis artificiales ( $D_x$ ) a intensidad constante (*CW-OSL*). Como el primer ciclo corresponde a la medida de la señal natural OSL ( $L_N$ ), no se regenera dosis alguna por lo que  $D_1=0s$ . Para el resto de ciclos, las dosis inducidas serán, para el caso de MPK, de 42, 96, 216, 0 y 96Gy respectivamente. Así, en cada ciclo, después de irradiar una alícuota, se aplica un *pre-heat* (240°C/40s) y un estímulo OSL (125°C/40s). Las cuentas detectadas son recogidas a intervalos de tal manera que, los 40s que dura el estímulo se dividen en canales (500 canales para las muestras MPK y ABC y 250 canales para el resto). Los valores pueden variar en función de las muestras, como se describe en las tablas anteriores.

En el segundo bloque de cada ciclo, en el cual se lleva a cabo la normalización, se aplica una dosis de igual intensidad para todos los ciclos de 18Gy, seguido de un *cut-heat* (para las muestras MPK de 240°C/10s) y estímulo OSL (125°C/40s) para obtener la señal OSL del *test-dose* ( $T_x$ ). Por último, en el tercer bloque se realiza un séptimo y último paso en el cual se aplica una estimulo lumínico con diodo azul (280°C/40s) para blanquear completamente la señal y comenzar así el siguiente ciclo.

#### 7.6.5. *Dose-recovery test*

Este test, a diferencia del test de reciclaje y recuperación, no se incluye en el propio protocolo SAR y consiste en blanquear la señal OSL un número variable de alícuotas mediante estímulo lumínico con diodo azul (280°C/40s) para, posteriormente irradiar con una dosis beta similar a la *De* esperada para cada muestra, aplicando un SAR idéntico al utilizado en la estimación de las dosis (*De*) individuales. Las dosis empleadas, para las muestras MPK, es de 84Gy. Para las muestras ABC1 y ABC2, de 120Gy, para la muestra ABC3 de 192Gy y para la muestra ABC4 de 96Gy. Respecto a la serie eólica, para aquellas muestras de las cuales se ha extraído la señal OSL, se ha aplicado una dosis de 48Gy.

Para las muestras de la serie eólica de las que se obtiene la señal pIR-IRSL de feldespatos, se aplica un estímulo infrarrojo (325°C/200s) para blanquear la señal y una dosis beta de 100Gy, aproximadamente.

#### 7.6.6. Test de blanqueamiento de la señal (*Bleaching test*).

En un *Bleaching test* se analiza la respuesta de la señal OSL ante distintos grados de blanqueamiento, de forma artificial. Para ello, y empleando cuatro alícuotas por muestra, se programa una secuencia con tantos ciclos como tiempos a comparar.

El primer paso de cada ciclo consta de un blanqueamiento completo de la señal de cada alícuota con un tratamiento térmico TL (500°C/40s). En el segundo paso (también de cada ciclo) se irradian todas las alícuotas durante 36Gy, seguido de un tercer paso en donde se aplica un *pre-heat* (200°C/10s). En el cuarto paso se procede al blanqueamiento artificial a tiempo variable (en el primer ciclo 0.0s, en el segundo ciclo 0.2s, en el tercer ciclo 1.0s, y así en los sucesivos ciclos, hasta siete, con los tiempos de blanqueamiento correspondientes a 2.0, 10.0, 100.0 y 1000.0s). Posteriormente se realiza un quinto paso correspondiente a nuevo un *pre-heat* (200°C/10s) para aplicar, en el sexto y último paso, un estímulo óptico (150°C/500s) del que se obtendrá la señal OSL para cada alícuota y por tanto para cada ciclo.

A partir de la señal OSL obtenida de cada una de las cuatro alícuotas que conforman cada tratamiento de blanqueamiento (0.0s, 0.2s, 1.0s, 2.0, 10.0, 100.0 y 1000.0s) se obtendrá un promedio y su desviación típica.

#### 7.6.7. Dosis en función del tamaño de la alícuota.

Para cada muestra se preparan un número estadísticamente significativo de alícuotas con un número de granos de 10, 30, 100, 300 y >700, para MPK, y de 10, 30, 100 y >300 para ABC, para comparar las posibles variaciones en la intensidad de la señal OSL y de las estimaciones de la De (Rodnight, 2006). Sobre ellas se aplica un SAR pero de dos únicos ciclos y cuya señal se interpolará en las curvas estándar promediadas para cada muestra. Así, en el primer ciclo, con una dosis inducida de 0s se aplica un *pre-heat* (260°C/10s) y un estímulo OSL (125°C/500s), para pasar a obtener la señal del *test-dose*, a dosis inducida de 18Gy (para ambos ciclos y todas las muestras), seguido de un *cut-heat* (240°C/10s) y un estímulo OSL (125°C/40s). Una vez obtenida la señal se blanquea completamente la alícuota con LEDs azul (300°C/40s), para pasar al segundo ciclo en el cual se aplica el mismo protocolo pero comenzando con una dosis inducida de 60Gy.

#### 7.6.8. Protocolo SAR modificado para feldespatos: señal pIR-IRSL.

Para obtener la señal pIR-IRSL se realiza un SAR modificado con granos de feldespato y alícuotas con un tamaño de 100 granos e incluyendo un total de siete ciclos en los cuales se inducen dosis de 0, 72, 216, 408, 600, 0 y 72Gy para las muestras MPK1, MPK4 y MPK6 y de 0, 72, 216, 408, 720, 0 y 72Gy para las muestras Bornalle, Corme, Langosteira y CALN1 (Tabla 3). La temperatura de *pre-heat* y *cut-heat* es de 320°C durante 60s. Además, se van a aplicar dos estímulos luminosos mediante diodos infrarrojos: uno a baja temperatura (50°C/200s) y otro a alta temperatura (290°C/200s), recogiendo las señales de ambos). Estos estímulos también se aplicarán en el *test-dose* después de inducir una dosis beta durante 36Gy para las muestras MPK1, MPK4 y MPK6 y de 60Gy para las muestras Bornalle, Corme, Langosteira y CLN1. Finalmente, se blanquean las trampas IRSL mediante un diodo IR a 325°C durante 100s, pasando al siguiente ciclo.

**Tabla 3.** Protocolo SAR modificado para obtener la señal pIR-IRSL de las muestras MPK1, MPK4, MPK6 fluviales, y de las muestras Bornalle, Corme, Langosteira y CLN1 de la serie eólica.

<b>Paso 1</b>	Dosis inducida  <b>MPK1, MPK4 y MPK6:</b> 0, 72, 216, 408, 600, 0 y 72Gy. <b>Bornalle, Corme, Langosteira y CLN1:</b> 0, 72, 216, 408, 720, 0 y 72Gy.
<b>Paso 2</b>	<i>Pre-heat</i> (320°C; 60s)
<b>Paso 3</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 50°C; 200s)
<b>Paso 4</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 290°C; 200s)
<b>Paso 5</b>	Dosis inducida para el <i>test-dose</i>  <b>MPK1, MPK4 y MPK6:</b> 36Gy; <b>Bornalle, Corme, Langosteira y CLN1:</b> 60Gy.
<b>Paso 6</b>	<i>Cut-heat</i> (320°C; 60s)
<b>Paso 7</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 50°C; 200s)
<b>Paso 8</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 290°C; 200s)
<b>Paso 9</b>	Blanqueado de trampas IRSL mediante estímulo luminoso (870nm; 325°C; 100s)

#### 7.6.9. Test de atenuación de la señal IRSL: Fading test.

En el test de atenuación se realiza una aproximación que trata de cuantificar la cantidad de señal IRSL que se pierde durante el almacenamiento de las muestras (ver apartados 6.1 y 6.4). En este test se blanquea completamente la señal natural IRSL, y se irradian un número variable de alícuotas, de forma artificial y a una dosis conocida. La señal IRSL regenerada en estas alícuotas se medirá a distintos intervalos de tiempo (inmediatamente después de la irradiación, seis horas después, un día después y una semana después) analizando las posibles pérdidas de señal IRSL (tanto para IRSL<sub>50</sub> como para IRSL<sub>290</sub>).

En el primer paso de este test (Tabla 4), y con un mínimo de cinco alícuotas, se aplica un estímulo IR a alta temperatura para blanquear las trampas IRSL (325°C/100s). En el segundo paso, una dosis de 300Gy. En el tercer paso se procede a simular el tiempo de almacenamiento, que en primer ciclo será de 0s y en el segundo de 21600s, si bien, para el tercer y cuarto ciclo, los discos se extraen del lector para ser almacenados durante un día y, posteriormente, una semana. A partir de ahí, el protocolo SAR es idéntico al explicado anteriormente, aplicando un *pre-heat* y *cut-heat* (320°C; 60s), estímulo IR a baja y alta temperatura (50°C/200s y 290°C/200s), *test-dose* a dosis inducida de 6Gy y blanqueamiento de la señal IRSL a alta temperatura (325°C/100s).

**Tabla 4.** Test de atenuación de la señal IRSL en el que se realizan 4 ciclos con 11 pasos cada uno, incluyendo una pausa temporal de 0s en el primer ciclo, 21600s en el segundo, un día en el tercero y una semana en el cuarto.

<b>Paso 1</b>	Blanqueado de trampas IRSL mediante estímulo luminoso (870nm; 325°C; 100s)
<b>Paso 2</b>	Dosis inducida (300Gy cada ciclo)
<b>Paso 3</b>	Pausa: ciclo1=0horas; ciclo2= 6horas; ciclo3=24horas; ciclo4=168horas.
<b>Paso 4</b>	<i>Pre-heat</i> (320°C; 60s)
<b>Paso 5</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 50°C; 200s)
<b>Paso 6</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 290°C; 200s)
<b>Paso 7</b>	Dosis inducida para el <i>test-dose</i> (6Gy)
<b>Paso 8</b>	<i>Cut-heat</i> (320°C; 60s)
<b>Paso 9</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 50°C; 200s)
<b>Paso 10</b>	Estímulo luminoso y medición de la señal IRSL (LEDs IR 870nm; 290°C; 200s)
<b>Paso 11</b>	Blanqueado de trampas IRSL mediante estímulo luminoso (870nm; 325°C; 100s)

#### 7.6.10. Determinación de los intervalos de tiempo de la señal OSL y pIR-IRSL rápida y su señal de fondo.

Para las muestras MPK, los 40 segundos de estímulo luminoso se integran en 500 canales por lo que la señal OSL rápida se integrará ente los canales 1 y 7, la señal de fondo LBG entre los canales 451 y 500, y la señal de fondo EBG entre los canales 8 y 57. Para el resto de muestras (ABC1, ABC2, ABC3, Mortaza2, Xalfas, Tal, CAF1, CAF2 y CAF3) los 40 segundos de estímulo se integran en 250 canales, por lo que la señal OSL rápida se integrará entre los canales 1 y 4, la señal de fondo LBG entre los canales 226 y 250, y la señal de fondo EBG entre los canales 5 y 25. Por su parte, para extraer la señal rápida al IRSL o pIR-IRSL (muestras Langosteira, Corme, Bornalle y CLN1) se integran los primeros 4 o 5 segundos y para la señal de fondo los últimos 20 segundos, teniendo en cuenta que el estímulo IR dura un total de 200 segundos (Wallinga, 2000). Así, la primera se integrará entre los canales 1 y 25 y la señal de fondo (LBG) entre los canales 801 y 1000.

## 7.7. Bibliografía.

- Aitken M.J. (1985) Thermoluminescence dating. Academic, London. 359pp.
- Aitken M.J. (1998) An Introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press. 267pp.
- Batchelor, G.K. (1967). An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press. 233pp.
- Bøtter-Jensen, L.; Thomsen, K.J. and Jain, M. (2010) Review of optically stimulated luminescence (OSL) instrumental developments for retrospective dosimetry. *Radiation Measurements* 45, 253-257.
- DTU Nutech (2014) Guide to "The Risø TL/OSL Reader". Center for Nuclear Technologies. Technical University of Denmark.
- Duller, G. A. T. (1995). Luminescence dating using single aliquots: methods and applications. *Radiation Measurements* 24, 217-226.
- Duller, G.A.T. (2007) Assessing the error on equivalent dose estimates derived from single aliquot regenerative dose measurements. *Ancient TL* 25, 15-24.
- Duller, G.A.T. (2008) Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating. *Boreas* 37, 589-612.
- Frenchen, M.; Schweitzer, U.; Zander, A. (1996) Improvements in sample preparation for the fine grain technique. *Ancient TL* 14, 15-18.
- Gutierrez-Becker, L. (2008) Caracterización de los sistemas dunares costeros del NW ibérico y su evolución durante el Cuaternario. Universidad de Coruña. Tesis doctoral.
- Jacobs, Z.; Duller, G. A. T. & Wintle, A. G. (2003) Optical dating of dune sand from Blombos Cave, South Africa: II – Single grain data. *Journal of Human Evolution* 44, 613-625.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E. (2008) Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database.
- Lamb, H. (1994) Hydrodynamics (6th ed.). Cambridge University Press.
- Mejdahl, V. and Winther-Nielsen, M. (1982) TL dating based on feldspar inclusions. *PACT* 6, 426-437.
- Mejdahl, V. (1982) Feldspar inclusion dating of ceramics and burnt stones. *PACT* 9, 351-364.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single- aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.
- Nonn, H. (1966) Les régions cotières de la Galice (Espagne). Etude géomorphologique. Publications de la Faculté des lettres de L'Université de Strasbourg. Foundation Baulig. Tomo III. 591 pp.
- Olley, J. M.; Caitcheon, G. G. & Roberts, R. G. (1999) The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 30, 207-217.
- Rodnight, H.; Duller, G. A. T.; Wintle, A. G. & Tooth, S. (2006) Assessing the reproducibility and accuracy of optical dating of fluvial deposits. *Quaternary Geochronology* 1, 109-120.
- Truelsen, J.L. and Wallinga, J. (2003) Zeroing of the OSL signal as function of grain size: investigating bleaching and thermal transfer for a young fluvial sample. *Geochronometria* 22, 1-8.
- Vidal-Romaní, J.R. (1977) Los depósitos sedimentarios del valle del Mero (La Coruña). *Gallaecia* 2, 37-46.



Wallinga, J.; Murray, A. and Wintle, A (2000) The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. *Radiation Measurements* 32, 529-533.

Wallinga, J. (2002) On the detection of OSL age overestimation using single-aliquot techniques. *Geochronometria* 21, 17-26.

Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30, 377-392.

Zimmerman, J. (1971) Thermoluminescent dating using fine grains from pottery *Archaeometry* 13, 29-52.

Internet:

<http://www.nutech.dtu.dk>

<http://www.cgiar-csi.org/>

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/inicio.do>

<http://augasdegalicia.xunta.gal/>

<https://www.google.com/earth/>

Goggle earth: US Dept. of State Geographer 2016, Google.



Capítulo 8.

Resultados.



## 8. Resultados.

En el siguiente apartado se describirán los resultados relacionados con la radiación natural del medio, con la señal de luminiscencia OSL, con la distribución de datos, las estimaciones de dosis equivalente ( $De$ ) y el rango de edad obtenido para los depósitos fluviales del río Mero (muestras MPK) y del río Ulla (muestras ABC) así como para la serie eólica.

En lo que atañe a la tasa de radiación natural del medio ( $DR$ ) se describirá la actividad estimada para los isótopos radiactivos de uranio, torio y potasio mediante espectrometría gamma de alta resolución e “*in situ*”, los valores de humedad y saturación estimados para la realización del cálculo más aproximado del grado de atenuación de la radiactividad ionizante por contenido en agua a lo largo del tiempo de enterramiento, así como los valores de cada una de las componentes de la  $DR$ , esto es, dosis cósmica, dosis alfa, beta y gamma, por último, dosis total.

Respecto a la señal OSL, se describirá la intensidad de cada una de las señales OSL obtenidas mediante los dos métodos de integración empleados (LBG y EBG) y de su normalización, la forma de la curva de caída (*decay-curve*) y de la curva de crecimiento-respuesta (*growth-curve*), la magnitud y tendencia del error absoluto y relativo de todas las alícuotas analizadas, el análisis de la señal de normalización ( $T_x$ ), así como los resultados obtenidos en el test de *pre-heat*, en el *dose-recovery-test* y en el *bleaching-test*. También se hará mención a variabilidad en las estimaciones de la  $De$  obtenidas al emplear diferentes tamaños de alícuota empleando el protocolo SAR, o a las diferencias observadas entre la señal OSL extraída mediante el método LBG y EBG.

Respecto a la distribución de los datos se describirá el porcentaje de sobre-dispersión ( $OD$ ) estimada y su relación con la  $DR$  y la componente beta ( $DR_{BETA}$ ), el tipo de distribución observada y sus características, el análisis de bondad de ajuste o normalidad para las muestras MPK y ABC, las estimaciones obtenidas al emplear los distintos modelos de edad (CAM, MAM e IEU) y el rango de edad absoluta calculado para cada muestra.

Respecto a la señal pIR-IRSL, para las muestras del río Mero (MPK) se describirán únicamente las cantidades de feldespato extraídas de las mismas, así como la forma de la curva de caída y curva de crecimiento de algunas de estas muestras. No obstante, para algunas de las muestras de la serie eólica de las cuales se ha obtenido una estimación de la  $De$  a partir de esta señal pIR-IRSL con grano grueso de feldespato potásico, se describirán en detalle los aspectos más relevantes siguiendo las mismas pautas llevadas a cabo al describir la señal OSL - esto es, análisis de la  $DR$ , intensidad de la señal pIR-IRSL, características de la curva de caída y curva de crecimiento, magnitud del error o el tipo de distribución observada, estimación de la  $De$  y cálculo del rango de edad, incluyendo además los resultados obtenidos en los test de atenuación (*fading-test*).

8.1. Resultados de los depósitos fluviales: muestras MPK y ABC.

8.1.1. Tasa de radiación natural ionizante (DR).

La tasa de radiación natural (DR), como ya se comentó en la introducción (ver apartado 4.1. y 4.2.), se compone de la radiación terrestre procedente de la desintegración de isótopos radiactivos y en la radiación cósmica. Para la cuantificación de la primera se mide la actividad de los isótopos inestables de uranio y torio, los isótopos hijos procedentes de sus cadenas de desintegración, así como la actividad de potasio-40.

8.1.1.1. Radiación terrestre: actividad de los isótopos radiactivos de uranio, torio y potasio.

En la tabla (Tabla 5) se describe la actividad de los radioisótopos de <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th y <sup>40</sup>K para las muestras analizadas MPK y ABC, incluyendo su error, estimadas mediante espectrometría gamma de alta resolución. También se incluye, como elementos principales de los grupos de equilibrio establecidos (ver apartado 4.2.1.2.) , la actividad de algunos de los isótopos hijo, como el <sup>226</sup>Ra y <sup>210</sup>Pb para la cadena de desintegración del <sup>238</sup>U, y del <sup>228</sup>Ra y <sup>228</sup>Th para la cadena de desintegración del <sup>232</sup>Th, con el propósito de detectar disequilibrio radiactivo en las mismas.

**Tabla 5.** Actividad de los radioisótopos uranio, torio y potasio (en Bq/Kg) incluyendo su error. (AMD: Actividad mínima detectable). También se adjunta la actividad de los radioisótopos de Ra-226 y Pb-210, y de Ra-228 y Th-228, como elementos principales de los grupos de equilibrio establecidos para las cadenas de U-238 y Th-232.

Actividad (Bq/Kg)	Cadena U-238			Cadena Th-232			U-235	K-40
	U-238 →	Ra-226→	→Pb-210	Th-232→	Ra-228→	→Th-228		
MPK1 (Bribes)	16.0±9	20.6±2	23.0±12	29.0±4	29.0±4	29.2±4	1.9±1	226±20
MPK2 (Sta.Cruz)	21.0±12	21.4±2	24.0±12	21.5±3	21.5±4	22.0±4	<AMD	82±16
MPK3 (Dorneda)	23.0±11	23.4±2	30.0±11	36.9±6	36.9±6	36.8±7	<AMD	113±15
MPK4 (Mera)	19.0±9	17.6±2	19.0±9	13.7±6	13.7±6	13.7±6	<AMD	91±15
MPK5 (Mesón)	21.0±10	26.9±2	<AMD	27.0±7	27.0±7	27.1±9	<AMD	127±16
MPK6 (Cecebre)	<AMD	8.8±1	<AMD	10.4±7	10.4±7	11.0±8	<AMD	78±17
MPK7 (Bastiagueiro)	26.0±2	26.0±2	27.0±3	26.0±1	26.0±1	<AMD	<AMD	115±79
MPK8 (Vilaboa)	29.0±13	31.0±16	31.0±19	53.0±2	53.0±8	53.0±2	<AMD	126±8
ABC1 (Borreiros)	11.3±5	13.0±1	13.0±8	14.7±1	14.7±1	14.9±1	<AMD	49±6
ABC2 (Borreiros)	38.6±8	51.0±3	45.0±5	48.3±23	48.3±23	48.3±23	1.2±0.6	175±9
ABC3 (Borreiros)	15.4±5	18.4±1	19.3±5	31.0±1	31.0±1	31.0±2	<AMD	75±5
ABC4 (Sta. Eulalia)	55.0±13	70.8±4	49.4±7	26.3±1	26.3±1	26.5±1	3.0±0.9	67±6

Así como el rango de actividad del  $^{235}\text{U}$  está generalmente por debajo de la actividad mínima detectable para las muestras MPK y ABC, a excepción de las muestras MPK1, ABC2 y ABC4 cuyo valor, por debajo de los 4(Bq/kg) no es relevante, el rango de actividad del  $^{238}\text{U}$  para las muestras MPK desarrolladas sobre esquistos oscila entre  $16\pm 9$  y  $26\pm 2$ (Bq/kg). Para la muestra MPK8, desarrollada sobre granitos (*senso lato*), este rango asciende a  $29\pm 13$ (Bq/kg). Para las muestras ABC, desarrolladas sobre una amplia cuenca que drena a través de muy diferentes litologías, predominando los granitoides en el curso bajo de la misma (ver apartado 2.3.), dicho rango varía desde  $11.3\pm 5.3$  hasta  $55\pm 13$ (Bq/kg). El rango de actividad del  $^{232}\text{Th}$  para las muestras MPK varía entre  $10.4\pm 7.7$  y  $36.9\pm 6.1$ (Bq/kg), a excepción de la muestra MPK8, que alcanza valores de  $53\pm 2$ (Bq/kg). Para las muestras ABC, estos valores están entre  $14.7\pm 1.1$  y  $48.3\pm 23$ (Bq/kg). Por último, el rango de actividad para el  $^{40}\text{K}$  para MPK varía entre  $78\pm 17$  y  $226\pm 20$ (Bq/kg), obteniéndose un valor de  $126\pm 8$ (Bq/kg) para la muestra MPK8, y un rango entre  $49\pm 6$  y  $175\pm 9$ (Bq/kg) para las muestras ABC.

Respecto al grado de desequilibrio, cuando se compara la actividad del  $^{238}\text{U}$  con la de su isótopo hijo  $^{226}\text{Ra}$  y ésta, a su vez, con la del  $^{210}\text{Pb}$  se pueden observar valores constantes para MPK y ABC, como también ocurre cuando se compara la actividad del  $^{232}\text{Th}$  con la de su isótopo hijo  $^{228}\text{Ra}$  y ésta, a su vez, con la del  $^{228}\text{Th}$ . No obstante, se observa, en la serie de  $^{238}\text{U}$  y para las muestras ABC2 y ABC4, un incremento en la actividad del radio respecto al uranio, que queda compensado por un descenso de la actividad del plomo, valores que, si se incluye el error, se aproximan bastante e incluso se solapan. Este tipo de variaciones, que no suponen diferencias significativas en la estimación de la *DR*, no están presentes en la cadena de desintegración del torio.

#### 8.1.1.2. Humedad y saturación: porcentaje en agua y atenuación de la DR.

El porcentaje de saturación, entendido como la cantidad de agua que puede ocupar el espacio poroso de la muestra, presenta valores que oscilan entre el 20 y el 40% para las muestras MPK, y un porcentaje de humedad, en el momento de la extracción, que varía entre un 3 y un 20% (Tabla 6). Para las muestras ABC, y en la misma tabla, el porcentaje de saturación presenta valores que varían entre un 24 y un 32%, con porcentajes de humedad que van del 4 al 12.5%.



**Tabla 6.** Porcentajes de humedad (H%) y saturación (Sat%) calculados en laboratorio, incluyendo la proporción de humedad respecto a la saturación (%Hum/sat) y la estimación del factor de atenuación de la DR por contenido en agua asumiendo un porcentaje de saturación de agua del 40% a lo largo del tiempo de enterramiento (W40%). La profundidad (Prof.) hace referencia a la distancia en la vertical desde punto de muestreo hasta la superficie del propio depósito de donde se extrajo la misma, y el espesor (Esp.), a la potencia del depósito en la vertical.

<b>Muestra</b>	<b>H (%)</b>	<b>Sat. (%)</b>	<b>%(Hum/SAT)</b>	<b>W (40%)</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Esp. (cm)</b>
<b>MPK1 (Bribes)</b>	5,58	17,68	31,56	7,07±1,77	300	400
<b>MPK2 (Sta.Cruz)</b>	7,98	19,89	40,11	7,96±1,99	100	200
<b>MPK3 (Dorneda)</b>	15,09	42,12	35,81	16,85±4,21	300	1400
<b>MPK4 (Mera)</b>	11,79	41,75	28,24	16,70±4,18	100	300
<b>MPK5 (Mesón)</b>	18,83	33,67	55,92	13,47±3,37	350	450
<b>MPK6 (Cecebre)</b>	7,38	19,77	37,33	7,91±1,98	150	200
<b>MPK7 (Bastigueiro)</b>	9,44	28,05	33,65	11,22±2,80	150	400
<b>MPK8 (Vilaboa)</b>	3,29	19,60	16,76	7,84±1,96	100	200
<b>ABC1 (Borreiros)</b>	3,99	28,87	13,82	11,55±2,89	300	400
<b>ABC2 (Borreiros)</b>	12,46	25,44	49,00	10,17±2,54	200	400
<b>ABC3 (Borreiros)</b>	6,36	24,18	26,31	9,67±2,42	70	400
<b>ABC4 (Sta. Eulalia)</b>	8,28	31,84	26,01	12,74±3,18	100	200

Si se tiene en cuenta que los valores de saturación corresponden a la cantidad máxima de agua que puede albergar la muestra (el 100%), los valores de humedad respecto a saturación (tabla 6) oscilan, para las muestras MPK, entre el 30 y el 40%, si bien, la muestra MPK5 presenta un 55% y MPK8 y 17%. Para las muestras ABC, los valores fluctúan entre el 26% y el 50%, si bien, la muestra ABC1 presenta un valor próximo al 14%.

Se asume que, de manera aproximada, el 40% del valor de saturación se corresponde con la cantidad de agua que ha albergado el sedimento durante su tiempo de enterramiento y el 10% del mismo dato se corresponde con el error asociado -esta aproximación se desarrollará en la discusión (ver apartado 9.1.1.2.). De esta manera se obtienen los valores descritos en la misma tabla (W40%), y empleados como factor de corrección de la atenuación de la radiación ionizante natural ( $DR_{TOTAL}$ ).

#### 8.1.1.3. Componentes de la tasa de radiación natural del medio y estimación de la $DR_{TOTAL}$ .

La tasa total de radiación natural ionizante ( $DR_{TOTAL}$ ) y su error asociado se presenta en la tabla (Tabla 7) desglosada en cada una de sus componentes que, para el caso del cuarzo, incluye dosis gamma ( $DR_{GAMMA}$ ), dosis beta ( $DR_{BETA}$ ) y dosis cósmica ( $DR_{CÓSMICA}$ ) y sobre las cuales se han aplicado los factores de corrección y conversión correspondientes (ver apartados 4.2.1.3. y 4.4. ).

La radiación cósmica presenta valores homogéneos, tanto para MPK como ABC, entre 0.13 y 0.19(Gy/ka) y con un error que no supera el 0.01.

**Tabla 7.** Estimación de la radiación ionizante para cada una de las componentes de la tasa de radiación natural del medio o *Dose-rate* (DR) medida en (Gy/ka) con su error (e) correspondiente: Dosis gamma ( $DR_{\text{GAMMA}}$ ), dosis beta ( $DR_{\text{BETA}}$ ), dosis cósmica ( $DR_{\text{CÓSMICA}}$ ) y dosis total ( $DR_{\text{TOTAL}}$ ). La componente gamma para la muestra MPK2 se ha medido *in situ* (\*) mediante un espectrómetro portátil. También se incluye la litología de la que proceden los sedimentos; para las muestras ABC la litología es variada, incluyendo granitos y esquistos, entre otros (Ver apartado 2.3. y figuras 2.10 y 2.11).

Muestra	$DR_{\text{GAMMA}}$ (Gy/ka)	$DR_{\text{BETA}}$ (Gy/ka)	$DR_{\text{CÓSMICA}}$ (Gy/ka)	$DR_{\text{TOTAL}}$ (Gy/ka)	Litología
MPK1 (Bribes)	0,60±0,14	0,82±0,17	0,15±0,01	1,50±0,25	esquisto
MPK2 (Sta.Cruz)	1,37±0,92*	0,54±0,14	0,13±0,01	1,83±0,14	esquisto
MPK3 (Dorneda)	0,56±0,12	0,65±0,16	0,13±0,01	1,21±0,20	esquisto
MPK4 (Mera)	0,34±0,08	0,46±0,08	0,18±0,01	0,90±0,13	esquisto
MPK5 (Mesón)	0,56±0,09	0,60±0,09	0,13±0,01	1,15±0,07	esquisto
MPK6 (Cecebre)	0,19±0,07	0,30±0,07	0,18±0,01	0,68±0,10	esquisto
MPK7 (Bastiaqueiro)	0,70±0,15	0,66±0,22	0,14±0,01	1,37±0,27	esquisto
MPK8 (Vilaboa)	0,79±0,14	0,84±0,09	0,17±0,01	1,64±0,16	granito
ABC1 (Borreiros)	0,36±0,03	0,36±0,05	0,14±0,01	0,72±0,06	variada
ABC2 (Borreiros)	0,89±0,10	0,99±0,13	0,14±0,01	1,88±0,16	variada
ABC3 (Borreiros)	0,56±0,13	0,57±0,18	0,17±0,01	1,14±0,22	variada
ABC4 (Sta. Eulalia)	1,00±0,21	0,96±0,23	0,19±0,01	1,97±0,32	variada

Los valores de la  $DR_{\text{GAMMA}}$  obtenidos para las muestras MPK son de 0.60±0.14(Gy/ka) para MPK1, 0.56±0.12(Gy/ka) para MPK3, 0.34±0.08(Gy/ka) para MPK4, 0.56±0.09(Gy/ka) para MPK5, 0.19±0.07(Gy/ka) para MPK6 y 0.70±0.15(Gy/ka) para MPK7. La  $DR_{\text{GAMMA}}$  observada para la muestra MPK8, desarrollada sobre granito es de 0.79±0.14(Gy/ka). Para las muestras ABC, la  $DR_{\text{GAMMA}}$  presenta valores de 0.36±0.03(Gy/ka) para ABC1, 0.89±0.10(Gy/ka) para ABC2, 0.56±0.13(Gy/ka) para ABC3 y 1.00±0.21(Gy/ka) para ABC4.

Los valores de la  $DR_{\text{GAMMA}}$  para la muestra MPK2 son los obtenidos mediante espectrometría *in situ* debido a la naturaleza del depósito, con gravas y cantos de cuarcita situados a una distancia inferior a 30cm respecto al punto de muestreo, y que podría falsear los datos obtenidos mediante espectrometría gamma de alta resolución, presentando un valor máximo de 1.37±0.92(Gy/ka), incluyendo un error muy elevado (Tabla 8). Respecto a las muestras ABC, la  $DR_{\text{GAMMA}}$  también presenta valores de 0.36±0.03(Gy/ka) para ABC1, 0.89±0.10(Gy/ka) para ABC2, 0.56±0.13(Gy/ka) para ABC3 y 1.00±0.21(Gy/ka) para ABC4.

**Tabla 8.** Proporción de potasio (%) y concentración equivalente de uranio (eU) y torio (eTh) en partes por millón (ppm) medidas en profundidad (20cm). También se incluye el ratio U/Th. Para la muestra MPK2 se ha realizado una segunda medición, también en profundidad, y para la muestra MPK5 se ha realizado una segunda medición en superficie.

Muestra	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)	U/Th
MPK 1 (Bribes)	2,1	3,7	11,1	0,33
MPK 2 (Sta.Cruz)	1,7	3,5	9,9	0,35
MPK 2 (Sta.Cruz) (2ª medición)	1,6	3,5	10,3	0,34
MPK 3 (Dorneda)	1,8	3,5	11,7	0,30
MPK 4 (Mera)	1,7	3,3	8,9	0,37
MPK 5 (Mesón) (profundidad)	1,7	3,5	10,6	0,33
MPK 5 (Mesón) (superficie)	0,8	3,2	8,9	0,36
MPK 8 (Vilaboa)	1,9	5,7	16,9	0,33

El rango para la proporción de uranio y torio observada mediante espectrometría gamma “*in situ*” en las muestras MPK es muy homogéneo, con valores entre 3.2 y 3.7ppm para el primero, y entre 8.9 y 11.7 para el segundo, si bien, la muestra MPK8 presenta valores superiores para ambos elementos, con proporciones de 5.7ppm para el uranio y de 16.9ppm para el torio. Por otra parte, el porcentaje de potasio estimado para todas estas muestras varía entre el 0.8% y el 2.1%.

Respecto a la componente beta ( $DR_{\text{BETA}}$ ) los valores varían entre  $0.30\pm0.07(\text{Gy/ka})$  y  $0.84\pm0.09(\text{Gy/ka})$  para las muestras MPK y entre  $0.36\pm0.05(\text{Gy/ka})$  y  $0.99\pm0.13(\text{Gy/ka})$  para las muestras ABC (Tabla 7). Así, y como se describe en la misma tabla, la estimación de la  $DR_{\text{TOTAL}}$  varía entre  $0.68\pm0.10(\text{Gy/ka})$  y  $1.83\pm0.14(\text{Gy/ka})$  para MPK, y entre  $0.72\pm0.06(\text{Gy/ka})$  y  $1.97\pm0.32(\text{Gy/ka})$  para ABC.

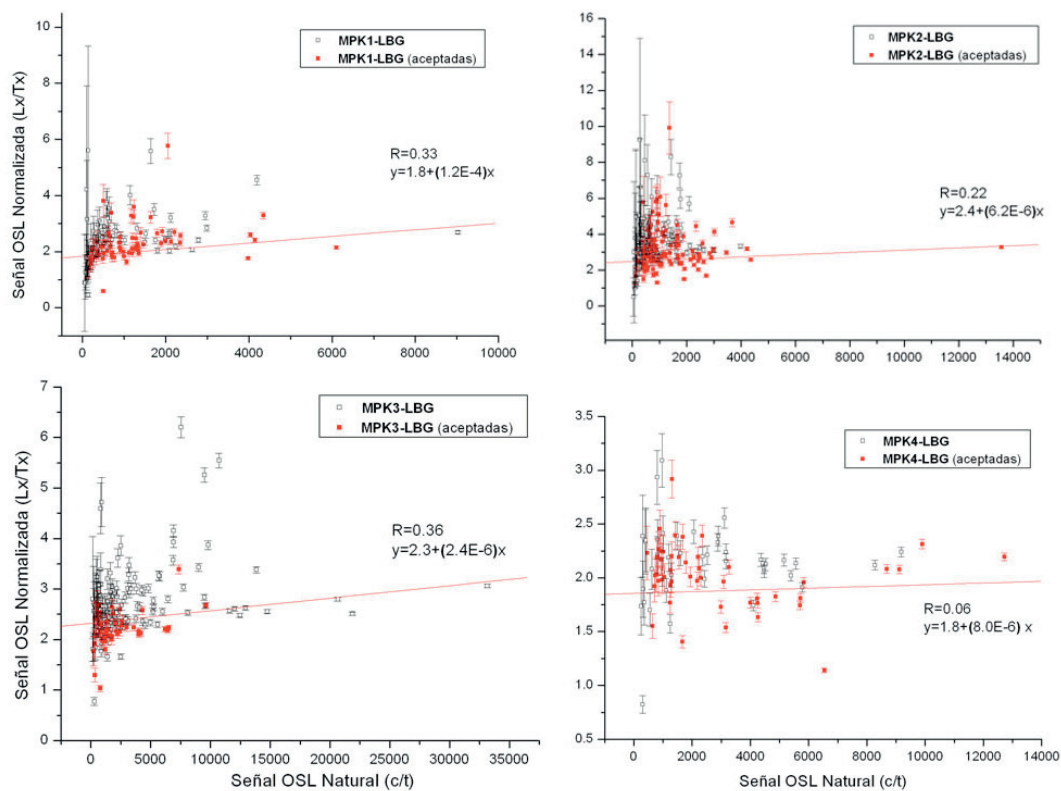
8.1.2. Características de la señal OSL para las muestras MPK y ABC.

8.1.2.1. Intensidad de la señal OSL.

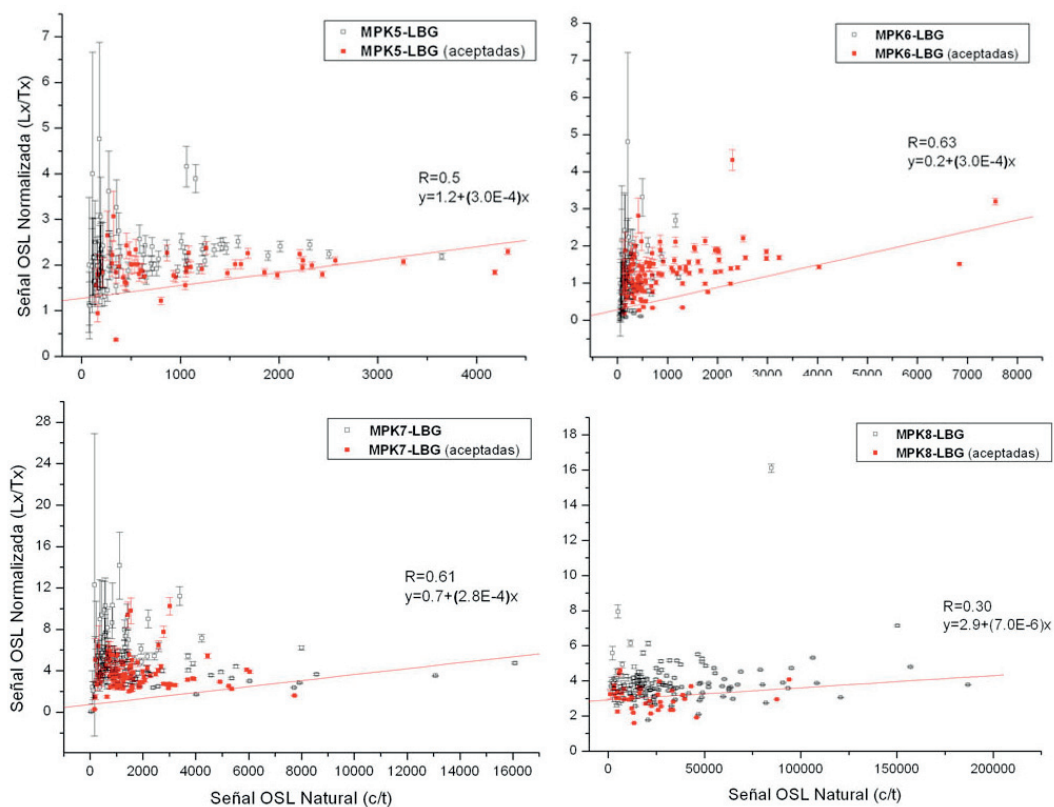
La señal OSL que presentan las muestras MPK se caracteriza por un bajo número de cuentas por unidad de tiempo -en adelante unidades (c/t) (Fig. 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4). Esto se traduce en una baja proporción de la señal OSL respecto a la señal de fondo de la misma (relación señal/ruído) y, por lo tanto, en una señal OSL de baja o muy baja intensidad, sobre todo para aquellas muestras extraídas en desarrollados sobre esquistos (MPK1, MPK2, MPK3, MPK4, MPK5, MPK6 y MPK7), y a diferencia de la muestra MPK8, cuyos sedimentos se desarrollan a partir de una litología granítica y presentando una señal OSL más intensa. Así, para la muestra

MPK1 se observan máximos de 9.000(c/t) y unos valores generales que oscilan entre 500 y 2.000(c/t), como ocurre con MPK2, cuyo máximo supera las 13.000(c/t). Los mismos valores registra MPK3, con un máximo que no llega a las 10.000(c/t), MPK4 con un máximo de 14.000(c/t) y MPK7 con un máximo de 16.000(c/t). MPK5 y MPK6 presentan un máximo en 4.400(c/t) con valores mayoritarios por debajo de las 1.000(c/t). MPK8 presenta un máximo próximo a las 190.000(c/t) –más típicos de una señal OSL intensa para el cuarzo - y valores mayoritarios entre 5.000 y 60.000(c/t). En el eje Y de la mismas figuras (Fig. 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4) se representa el ratio ( $L_N/T_N$ ) que representa la normalización de la señal natural OSL con la señal OSL del *Test-dose* (ver apartado 3.4.3.2.). En ellas se puede observar una disminución del error con la intensidad. No obstante, el incremento de la intensidad de la señal natural OSL no supone un aumento en el ratio de la señal OSL natural normalizada  $L_N/T_N$ , estableciéndose una ausencia de correlación de tipo lineal, con coeficientes de correlación (R) bajos, así como ausencia de tendencia entre ambas señales, obteniéndose ecuaciones de ajuste lineal caracterizadas por una pendiente muy poco pronunciada, máxime si se tienen en cuenta las diferencias de escala existentes. Así, y como se ha comentado anteriormente, la señal natural OSL ( $L_N$ ) resultante es de baja intensidad y con unos ratios  $L_N/T_N$  que generalmente no superan valores de 5, independientemente del método LBG o EBG, y que advierten de la baja sensibilidad de luminiscencia de los materiales empleados -a excepción de la muestra MPK8 cuyo ratio oscila entre valores de 5 y 10 al emplear el método EBG.

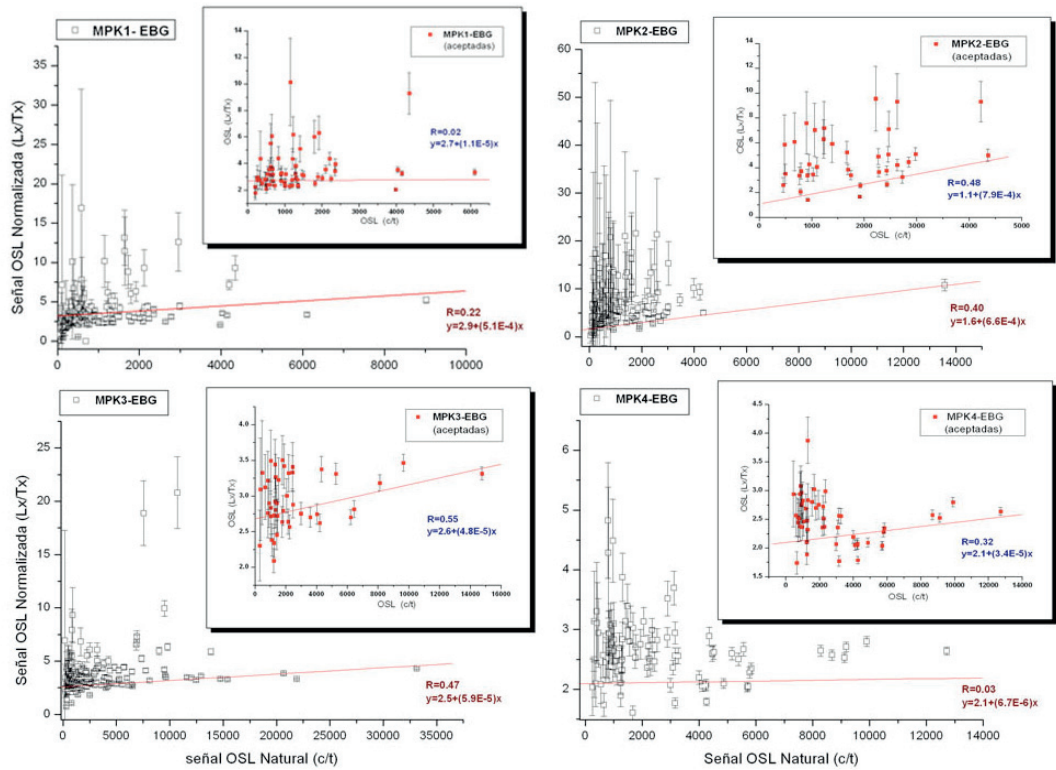
Para las muestras ABC la intensidad de la señal presenta unos valores superiores a MPK (Fig. 8.1.5, 8.1.6, 8.1.7, 8.1.8). La muestra ABC1 presenta un máximo de 70.000(c/t) con valores que generalmente se sitúan entre las 5.000 y las 20.000(c/t), si bien, la señal obtenida con un tamaño de alícuota de 10 granos presenta una señal OSL natural que generalmente no supera las 10.000(c/t). La muestra ABC2 presenta máximos de 150.000(c/t), con valores entre 10.000 y 20.000 (c/t). ABC3 presenta máximos de 200.000(c/t), con entre 10.000 y 50.000(c/t) y ABC4 presenta máximos de 25.000(c/t) con valores generales entre 1.000 y 10.000(c/t) para un tamaño de alícuota de 100 granos, y valores inferiores a 2.000(c/t) para un tamaño de alícuota de 10 granos.



**Figura 8.1.1.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para el método de integración de la señal OSL LBG, destacando en color rojo, aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras MPK1, MPK2, MPK3 y MPK4. Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).

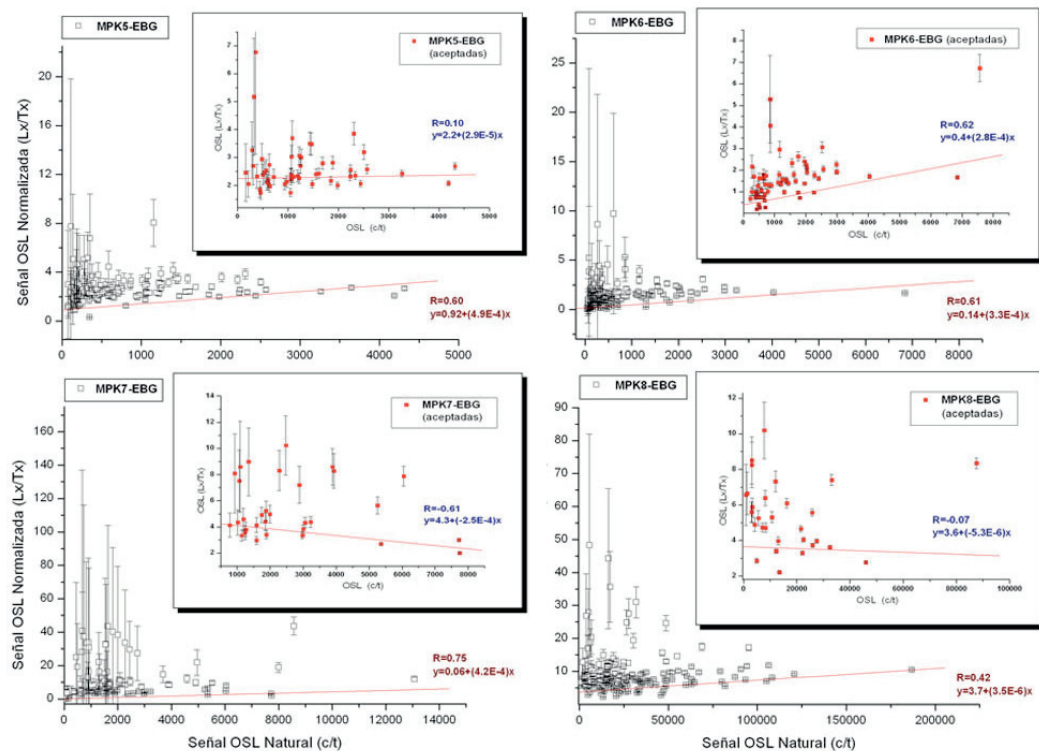


**Figura 8.1.2.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para el método de integración de la señal OSL LBG, destacando en color rojo, aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras MPK5, MPK6, MPK7 y MPK8. Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).



**Figura 8.1.3.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para el método de integración de la señal OSL EBG, destacando en color rojo, aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de la  $D_e$ , para las muestras MPK1, MPK2, MPK3 y MPK4. Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).

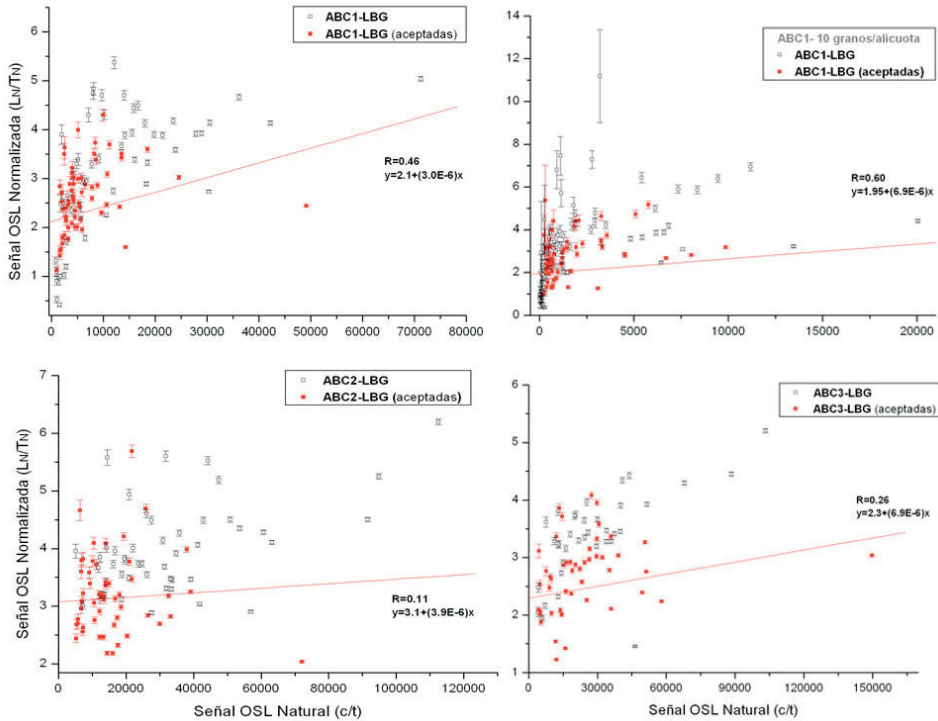




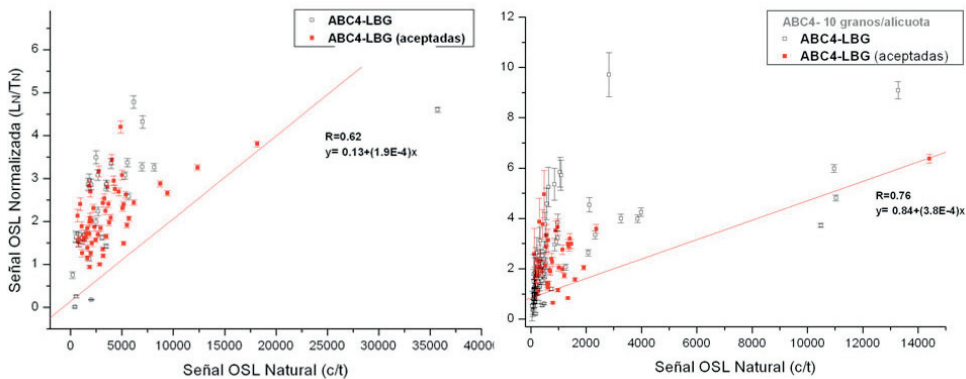
**Figura 8.1.4.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo (c/t), para el método de integración de la señal OSL EBG, destacando en color rojo, aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de la  $D_e$ , para las muestras MPK5, MPK6, MPK7 y MPK8. Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).

Para las muestras ABC1, ABC2 y ABC3 el ratio  $L_N/T_N$  obtenido mediante el método LBG es de 5 o inferior, y los obtenidos mediante el EBG varían entre 5 y 15. Para ABC4, los valores son similares entre ambos métodos, todos por debajo de 7, si bien, la contribución del error es siempre más baja para LBG, observándose rangos de errores mayores para EBG (Figuras 8.1.5, 8.1.6, 8.1.7, 8.1.8). De forma general, no se observa, para LBG y EBG, una reducción del error al incrementarse la intensidad de la señal natural OSL. Además, se observan ratios similares para las muestras ABC1 y ABC4 de las cuales se ha obtenido una señal a partir de un tamaño de alícuota de 10 granos.

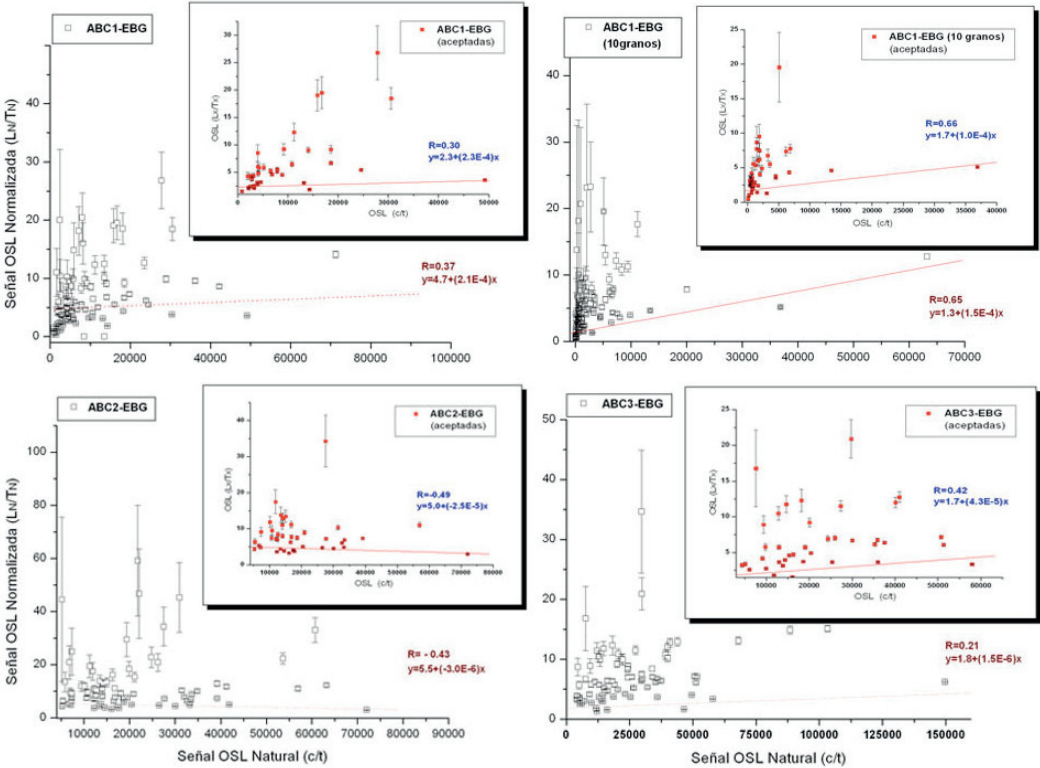
A diferencia de las muestras MPK, con una señal OSL natural normalizada  $L_N/T_N$  muy homogénea e independientemente de la intensidad de la señal OSL natural, para las muestras ABC se observa como este ratio o señal OSL normalizada tiende a aumentar al incrementarse la intensidad de la señal natural OSL, sobre todo al emplear el método de integración de la señal de fondo LBG, lo que indica una mayor sensibilidad de luminiscencia de estos materiales si bien, tanto el coeficiente de correlación (R) obtenido en el ajuste de tipo lineal como la pendiente de la recta presentan valores bajos, de la misma manera que ocurre con el método EBG para las muestras ABC. No obstante, cuando se emplea el método de integración EBG, mediante el cual hipotéticamente se optimiza la componente rápida y se excluye la contribución de las componentes media y lenta, se aprecia, un ligero incremento del ratio  $L_N/T_N$  con la intensidad de la señal OSL, si bien, el número de alícuotas que superan los criterios de aceptación y el número final de estimaciones individuales se reducen, disminuyendo también la dispersión de los datos.



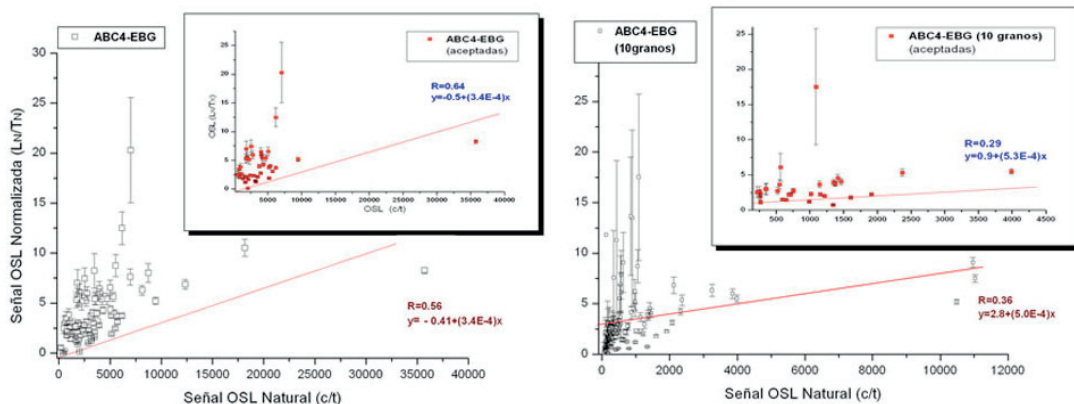
**Figura 8.1.5.** Señal natural OSL normalizada ( $L_n/T_n$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para el método de integración LBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras ABC1 con 100 granos por alícuota (arriba-izq.), ABC1 con 10 granos por alícuota (arriba-dcha.), ABC2 (abajo-izq.) y ABC3 (abajo-dcha.). Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).



**Figura 8.1.6.** Señal natural OSL normalizada ( $L_n/T_n$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para el método de integración LBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para la muestra ABC4 con 100 granos por alícuota (izq.) y 10 granos por alícuota (dcha.). Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).



**Figura 8.1.7.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo (c/t), para el método de integración EBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras ABC1 con 100 granos por alícuota (arriba- izq.), ABC1 con 10 granos por alícuota (arriba-dcha.), ABC2 (abajo-izq.) y ABC3 (abajo-dcha.). Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión (R).



**Figura 8.1.8.** Señal natural OSL normalizada ( $L_N/T_N$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo (c/t), para el método de integración EBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para la muestra ABC4 con 100granos por alícuota (izq.) y 10 granos por alícuota (dcha.). Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión (R).

Los valores del coeficiente de correlación (R) y de la pendiente de la recta resultante del análisis de correlación lineal entre la señal natural OSL y la señal OSL normalizada para las muestras MPK y ABC se describen en la tabla (Tabla 9). En base a estos resultados, la señal OSL normalizada no varía en función de la intensidad de la señal OSL, ya baja de por sí. Ambos parámetros, el coeficiente R y la pendiente de la recta, presentan unos valores que, generalmente son inferiores a 0.7 y 0.5, respectivamente, con la salvedad de que suponen las muestras MPK7-EBG y ABC4-LBG (10granos), incluyendo todas las alícuotas, aceptadas y no aceptadas, cuyo coeficiente alcanza valores máximos (de 0.75 y 0.76 respectivamente) y vienen acompañados de valores para la pendiente (de 0.42 y 0.38). No obstante, estos valores varían al excluir aquellas alícuotas que están dentro del umbral estimado de saturación, cambiando incluso de signo, como ocurre con las muestras MPK7 y MPK8 (con coeficientes R de -0.6 y -0.07, respectivamente), aspecto que hace referencia a las diferencias y variabilidad de la sensibilidad de luminiscencia y respuesta al protocolo SAR que presenta la señal OSL natural ( $L_N$ ) cerca de los límites de saturación y la señal de normalización del *test-dose* ( $T_N$ ) empleada para obtener la señal normalizada ( $L_N/T_N$ ), como se comentará posteriormente en la discusión (ver apartado 9.1.2.).

En base a estos resultados se desestima una correlación de tipo lineal entre ambas señales para todas las muestras MPK y ABC. (NOTA: Se han analizado otros tipo de ajuste, como el exponencial o logarítmico, sin que varíen los resultados para cada una de las muestras analizadas).

**Tabla 9.** Coeficiente de correlación lineal (R) y pendiente de la recta de ajuste lineal (pte.) entre la señal natural OSL y la señal OSL normalizada, obtenidas mediante el método LBG y EBG e incluyendo todas las alícuotas, así como el de las alícuotas aceptadas mediante el método EBG, para las muestras MPK y ABC. (\*) Para ABC1 y ABC4 también se analizan estos parámetros con un tamaño de alícuota de 10 granos.

MUESTRA	MPK-LBG (Todas alícuotas)		MPK-EBG (Todas alícuotas)		EBG (alícuotas aceptadas)	
	R	pte.	R	pte.	R	pte.
MPK1	0,33	0,12	0,22	0,51	0,02	0,01
MPK2	0,22	0,06	0,40	0,66	0,48	0,79
MPK3	0,36	0,02	0,47	0,06	0,55	0,04
MPK4	0,06	<0,01	0,03	<0,01	0,32	0,03
MPK5	0,50	0,30	0,60	0,49	0,10	0,03
MPK6	0,63	0,30	0,61	0,33	0,62	0,30
MPK7	0,61	0,28	0,75	0,42	-0,61	-0,25
MPK8	0,30	<0,01	0,42	<0,01	-0,07	<-0,01
ABC1	0,46	<0,01	0,37	0,21	0,30	0,23
ABC1*	0,60	<0,01	0,65	0,10	0,66	0,10
ABC2	0,11	<0,01	-0,43	<-0,01	-0,49	-0,02
ABC3	0,26	<0,01	0,21	<0,01	0,42	0,04
ABC4	0,62	0,19	0,56	0,34	0,64	0,34
ABC4*	0,76	0,38	0,36	0,50	0,29	0,53

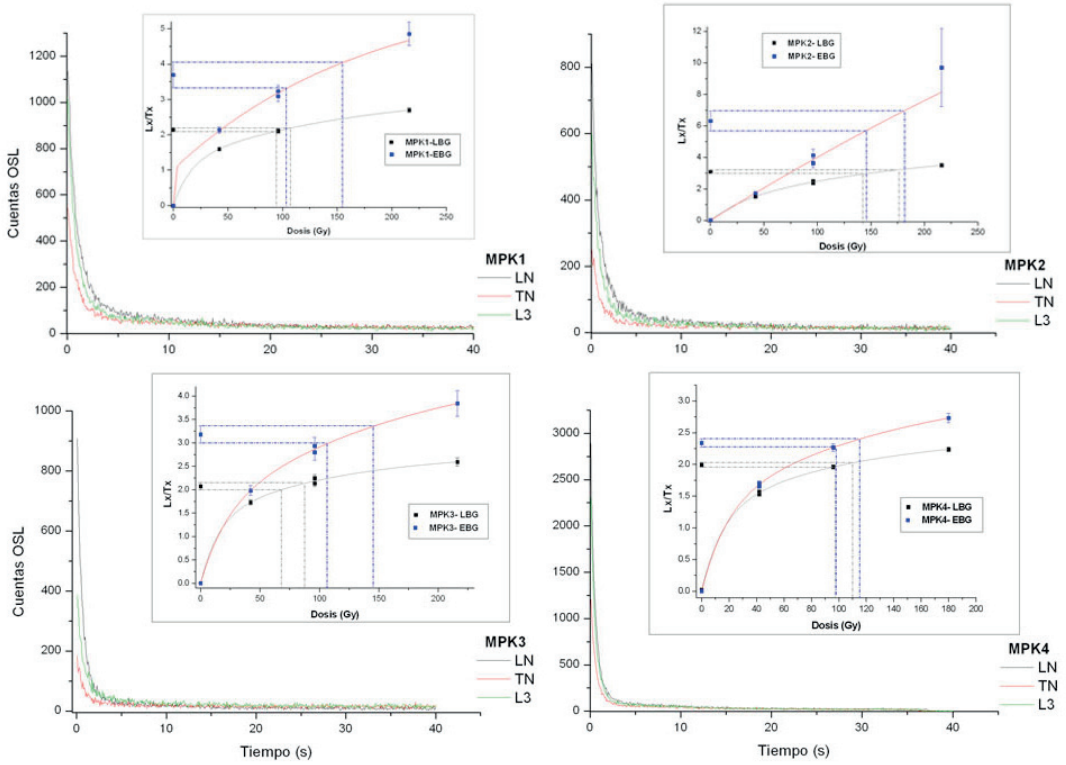
### 8.1.2.2. Curva de caída y curva crecimiento.

La curva de caída de la señal OSL (*OSL decay curve*) permite, entre otros aspectos, comprobar de que manera están contribuyendo las distintas componentes de la señal OSL –rápida, media y lenta, asumiendo el modelo de tres componentes, citado en los principios de luminiscencia (ver apartado 3.3.). Así, alícuotas que presentan una caída rápida en la que se registra un alto número de cuentas dentro de los 0.64 segundos iniciales –intervalo seleccionado para extraer la componente rápida de la señal OSL- tendrán una mayor probabilidad de incluirse en la estimación final de la *De*. Por otro lado, alícuotas con una curva de caída de la señal OSL que presente aberraciones, niveles de fondo elevados o una caída exponencial pero lenta o prolongada a lo largo del tiempo de estímulo, tendrán mayor probabilidad de exclusión –este aspecto también atañe a la curva de crecimiento (*OSL growth curve*) que se genera a partir de los datos obtenidos con el SAR.

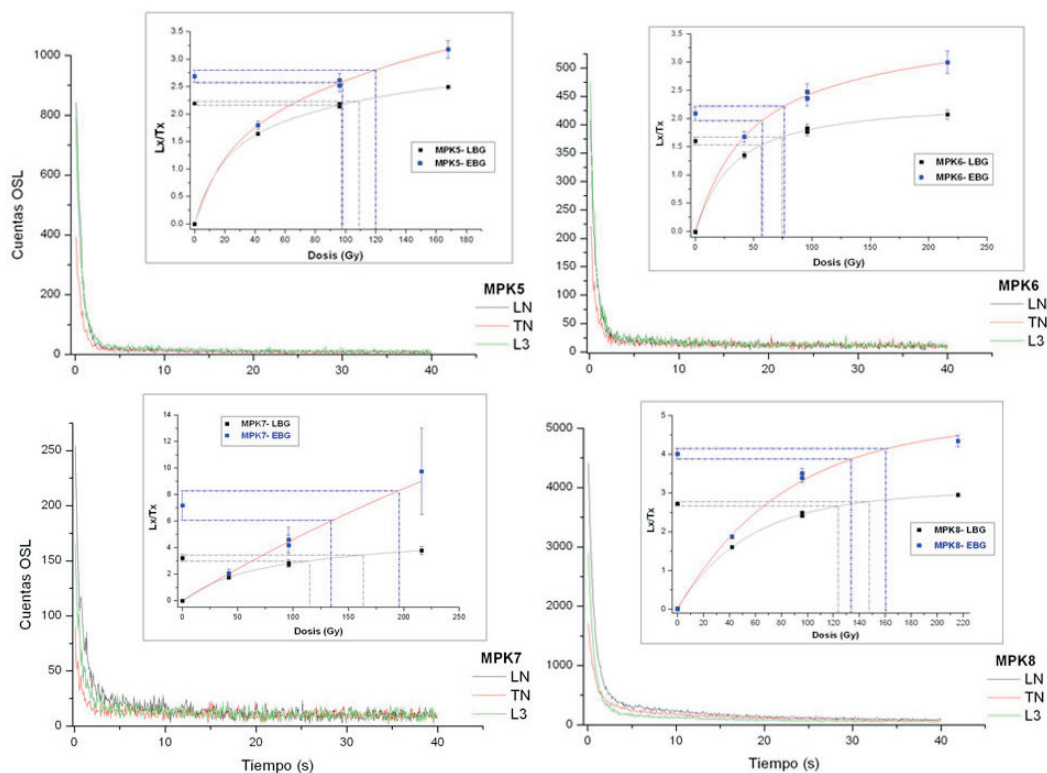
En las figuras (Fig. 8.2.1 y 8.2.2) se representan las curvas de caída (*decay-curve*) pertenecientes a la señal OSL natural ( $L_N$ ), a la señal regenerada en el tercer ciclo ( $L_3$ ) y la señal natural OSL obtenida en el *test-dose* del primer ciclo ( $T_N$ ), de algunas de las alícuotas más representativas para cada una de las muestras MPK, con un recuadro interno que representa la curva de crecimiento (*growth-curve*) de las mismas, mediante el método LBG y el método EBG. Estas curvas de caída experimentan un descenso rápido de la señal que generalmente se completa una vez transcurrido dos segundos de estímulo lumínico alcanzando aproximadamente una reducción del 90% de la señal inicial o incluso inferiores al 5% a partir de los veinte segundos. Éstos últimos valores corresponderán a la señal de fondo mediante el método LBG, que integra la señal correspondiente a los cuatro últimos segundos. Por otro lado, mediante el método EBG se emplea una señal de fondo que supone el 50% de la señal inicial, al integrar la señal que va desde los 0.6 a los 4.6 segundos, lo que implica un aumento considerable del ratio señal/ruido de un 10:1 mediante el LBG a un 1:1 mediante el EBG, obteniendo así un mayor rendimiento de la componente rápida y aislando, hipotéticamente, la contribución de las componentes media y lenta.

Las curvas de caída para las muestras ABC representadas en las figuras (Fig. 8.2.3) presentan un patrón similar, con una reducción de la señal en un 50% o más transcurridos 0.68 segundos y obteniendo valores inferiores al 5% de la señal inicial transcurridos 20 segundos. Esta proporción por debajo del 5% de la señal inicial corresponde, además, a la señal de fondo que se obtiene mediante el método LBG y que integra la señal correspondiente a los cuatro últimos segundos de estímulo luminoso. Por su parte, la señal de fondo que se obtiene mediante el método EBG y que integra la señal correspondiente entre los 0.6 y los 4.6 segundos, supone una reducción paulatina de la señal de casi un 90% de la misma, explicando las proporciones del ratio señal/ruido de cada uno de los métodos de integración.

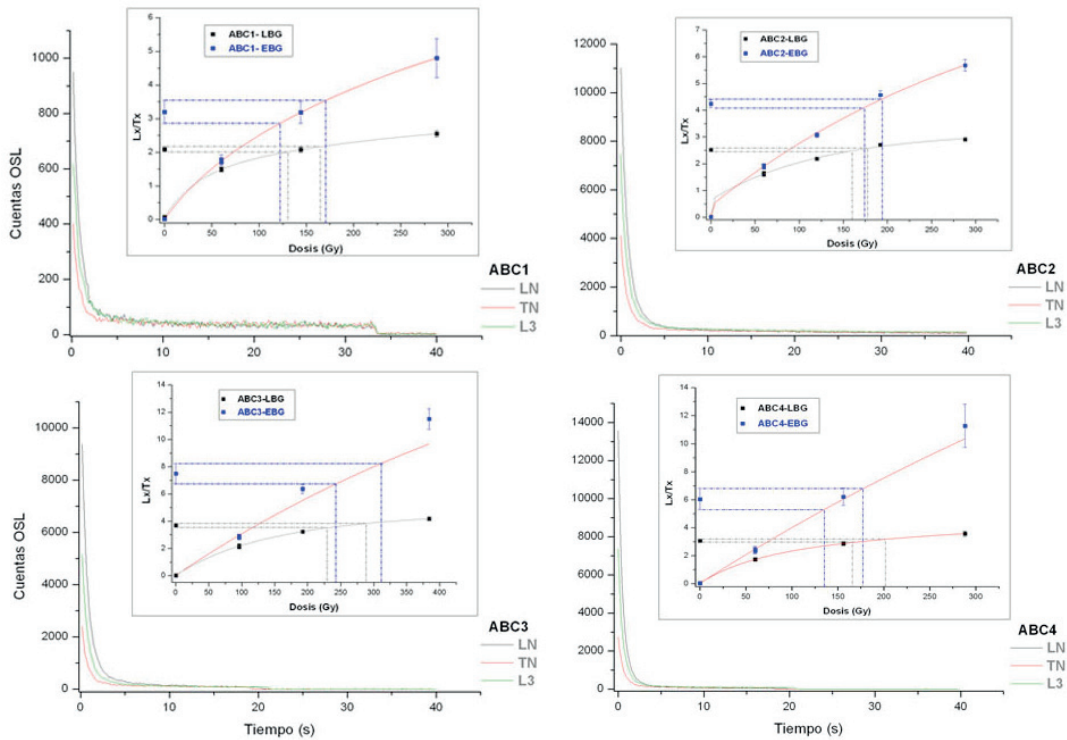




**Figura 8.2.1.** Curva de caída de la señal OSL natural ( $L_N$ ), la señal OSL del *test-dose* natural ( $T_N$ ) y la señal OSL regenerada en el segundo ciclo del SAR ( $L_3$ ) extraídas de alícuotas representativas para las muestras MPK1, MPK2, MPK3 y MPK4, en donde se representan las cuentas de luminiscencia detectadas (eje Y) por unidad de tiempo (eje X). En el recuadro interno se representan las curvas de crecimiento de las mismas alícuotas al aplicar un SAR y empleando los métodos LBG y EBG, y en donde se enfrenta la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la dosis, en grays (Gy).



**Figura 8.2.2.** Curva de caída de la señal OSL natural ( $L_N$ ), la señal OSL del *test-dose* natural ( $T_N$ ) y la señal OSL regenerada en el segundo ciclo del SAR ( $L_3$ ) extraídas de alícuotas representativas para las muestras MPK5, MPK6, MPK7 y MPK8, en donde se representan las cuentas de luminiscencia detectadas (eje Y) por unidad de tiempo (eje X). En el recuadro interno se representan las curvas de crecimiento de las mismas alícuotas al aplicar un SAR y empleando los métodos LBG y EBG, y en donde se enfrenta la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la dosis, en grays (Gy).



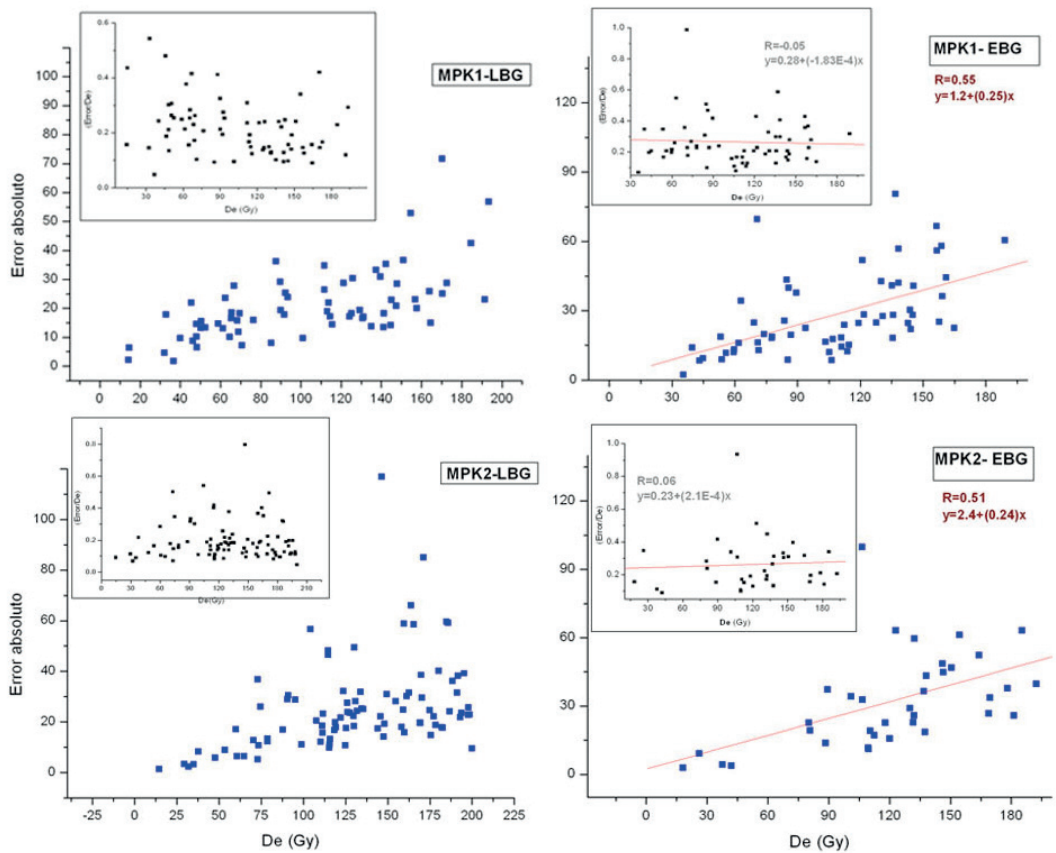
**Figura 8.2.3.** Curva de caída señal de alícuotas representativas para la muestra ABC, en donde se representan las cuentas de luminiscencia detectadas (eje Y) por unidad de tiempo (eje X) de la señal natural ( $L_N$ ), la señal del *test-dose* natural ( $T_N$ ) y la señal regenerada en el segundo ciclo del SAR ( $L_3$ ). En el recuadro interno se representan las curvas de crecimiento de las mismas alícuotas al aplicar un SAR y empleando los métodos LBG y EBG, y en donde se enfrenta la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la dosis, en grays (Gy).

En general, los ratios de la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) obtenida a medida que se incrementa la dosis y mediante el método EBG, son superiores a los que proporciona el método LBG, lo que implica que la curva de crecimiento EBG se sitúa por encima de la curva LBG. El incremento del ratio magnifica la curva EBG. Este hecho implica que, mediante el método LBG se alcance el umbral de saturación a dosis más bajas. No obstante, no se observan diferencias significativas entre las estimaciones de la  $D_e$  obtenidas con uno u otro método de integración.

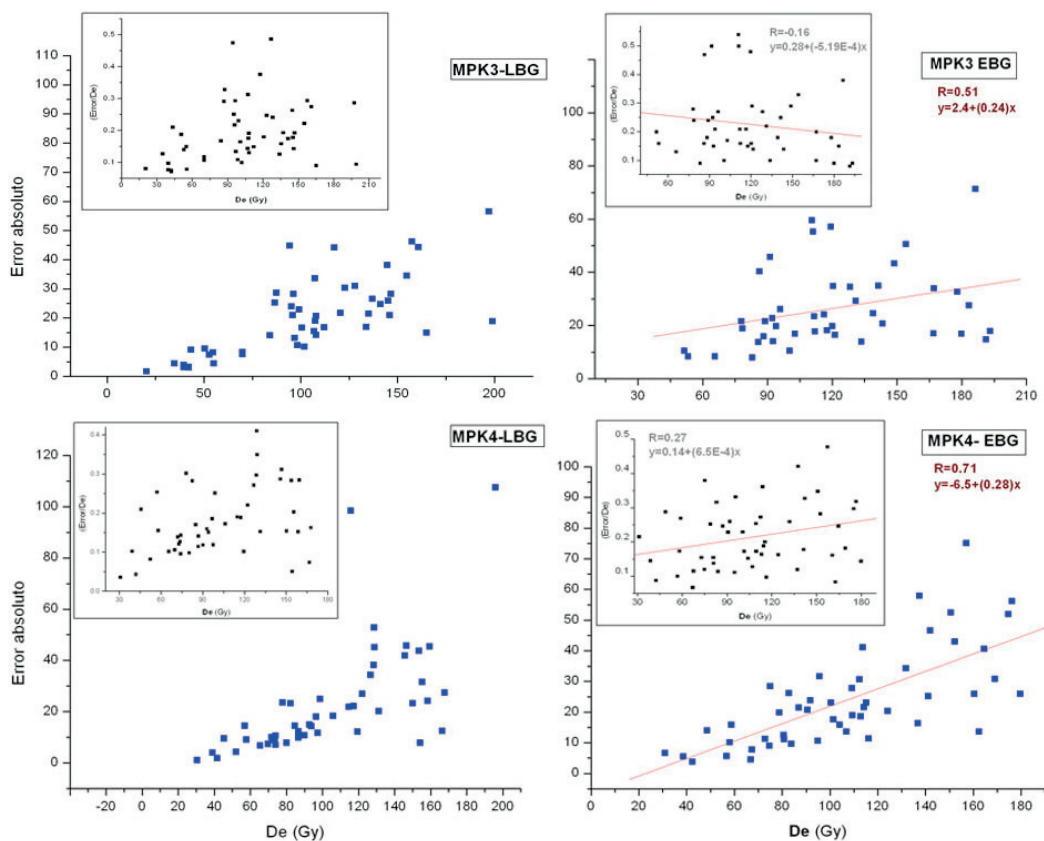
#### 8.1.2.3. Error absoluto y relativo.

La magnitud del error en función de la dosis es, a rasgos generales, elevada, incrementándose al emplear el método EBG, como se puede observar en las figuras (Fig. 8.3.1, 8.3.2, 8.3.3, 8.3.4, 8.3.5, 8.3.6 y 8.3.7), para las muestras MPK y ABC. La reducción del ratio señal/ruido que se obtiene al emplear un señal de fondo elevada de intensidad (mediante el método EBG), similar a una señal inicial poco intensa, implica, entre otros aspectos, un incremento del error asociado. En estas figuras se representa el error absoluto de cada una de las alícuotas aceptadas frente a la estimación de la  $D_e$ , y en ellas se puede observar una amplia dispersión y un incremento del error con la dosis, sobre todo al emplear el método LBG. No obstante, en base a los resultados obtenidos en los análisis de correlación lineal, que se describirán más adelante, no se puede asumir correlación lineal entre ambas variables.

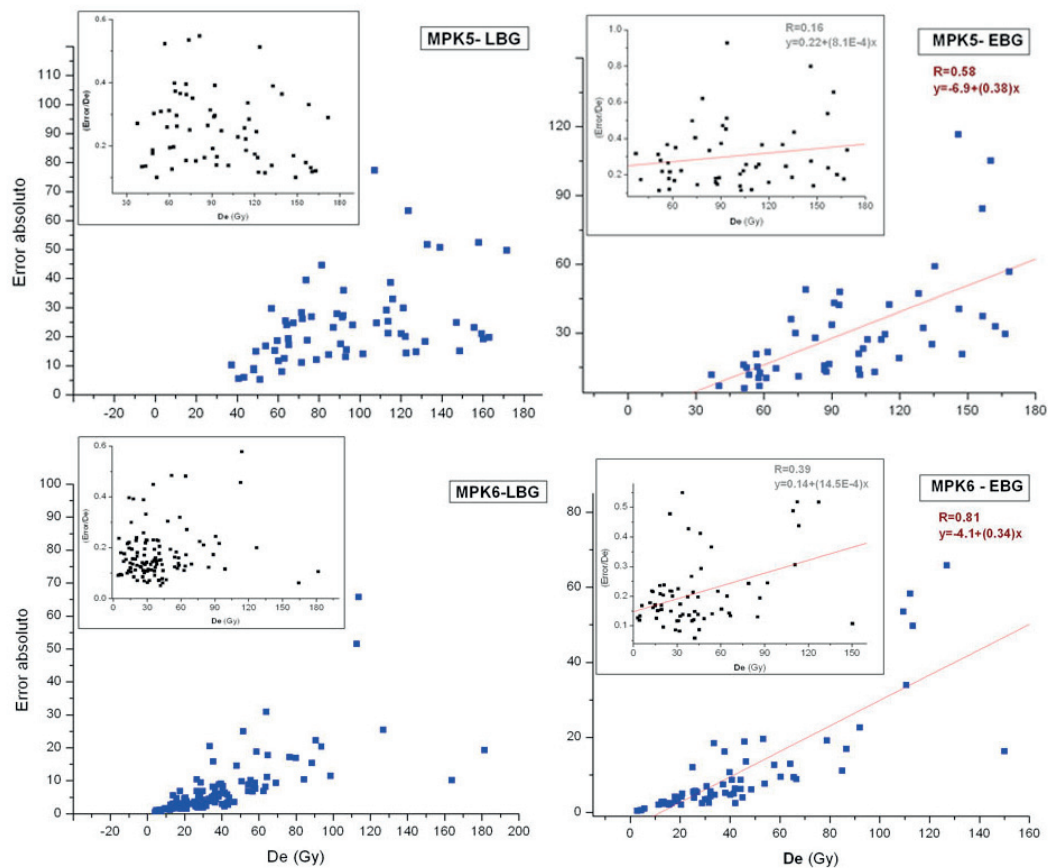
Respecto al error relativo representado en el recuadro interno de las mismas figuras (Fig. 8.3.1, 8.3.2, 8.3.3, 8.3.4, 8.3.5, 8.3.6 y 8.3.7), se observan valores para las muestras MPK que oscilan entre el 10% y el 40%, pudiendo alcanzar incluso el 50% (Fig. 8.3.1, 8.3.2, 8.3.3, 8.3.4), si bien, de forma generalizada, estos se centran entre el 10% y el 20%, o el 30% para la muestra MPK8. En estas gráficas, en donde se representa este error relativo –en tanto por uno– frente a la dosis, se observa una amplia y ausencia de correlación de tipo lineal entre ambos parámetros, para cualquiera de los métodos de integración de la señal empleado (LBG o EBG). Así, la variabilidad del error se mantiene dentro de los rangos descritos anteriormente, independientemente del valor de la dosis estimada, aspecto que también atañe a las muestras ABC las cuales presentan un patrón similar, con una amplia dispersión e independencia entre dosis y error. En las figuras (Fig. 8.3.5, 8.3.6 y 8.3.7) se observa como la magnitud del error es similar entre los métodos LBG y EBG, generalmente entre el 5% y el 15%. No obstante, para el método EBG se observan valores que alcanzan el 30% y que no se corresponden con las dosis más altas, lo que hace referencia, de nuevo, a la falta de relación entre dosis y error.



**Figura 8.3.1.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras MPK1 y MPK2, a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.

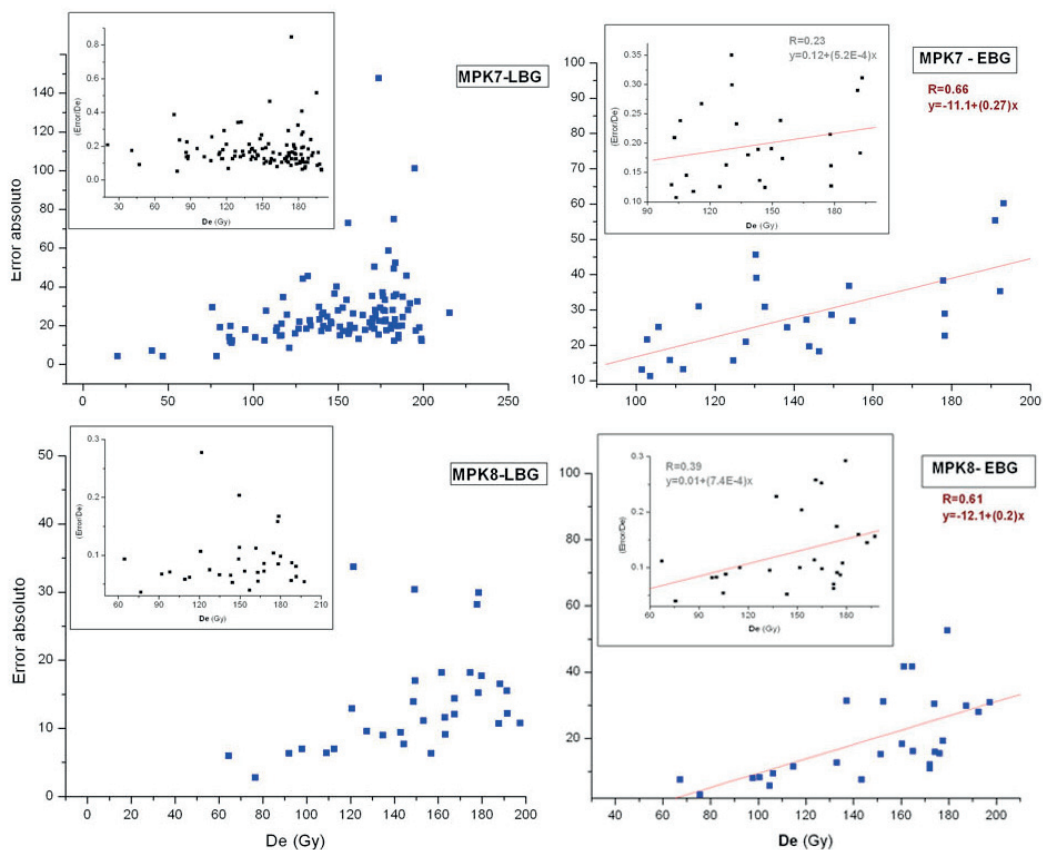


**Figura 8.3.2.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras MPK3 y MPK4 a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.

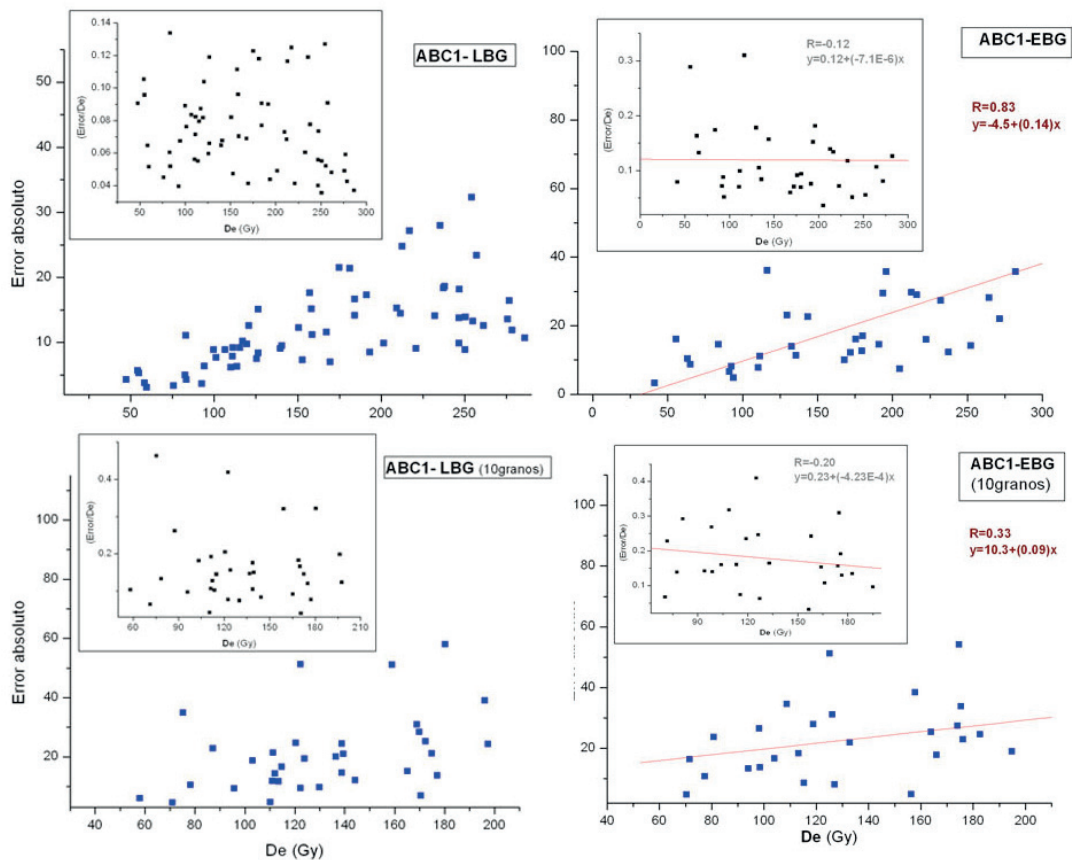


**Figura 8.3.3.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras MPK5 y MPK6, a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.

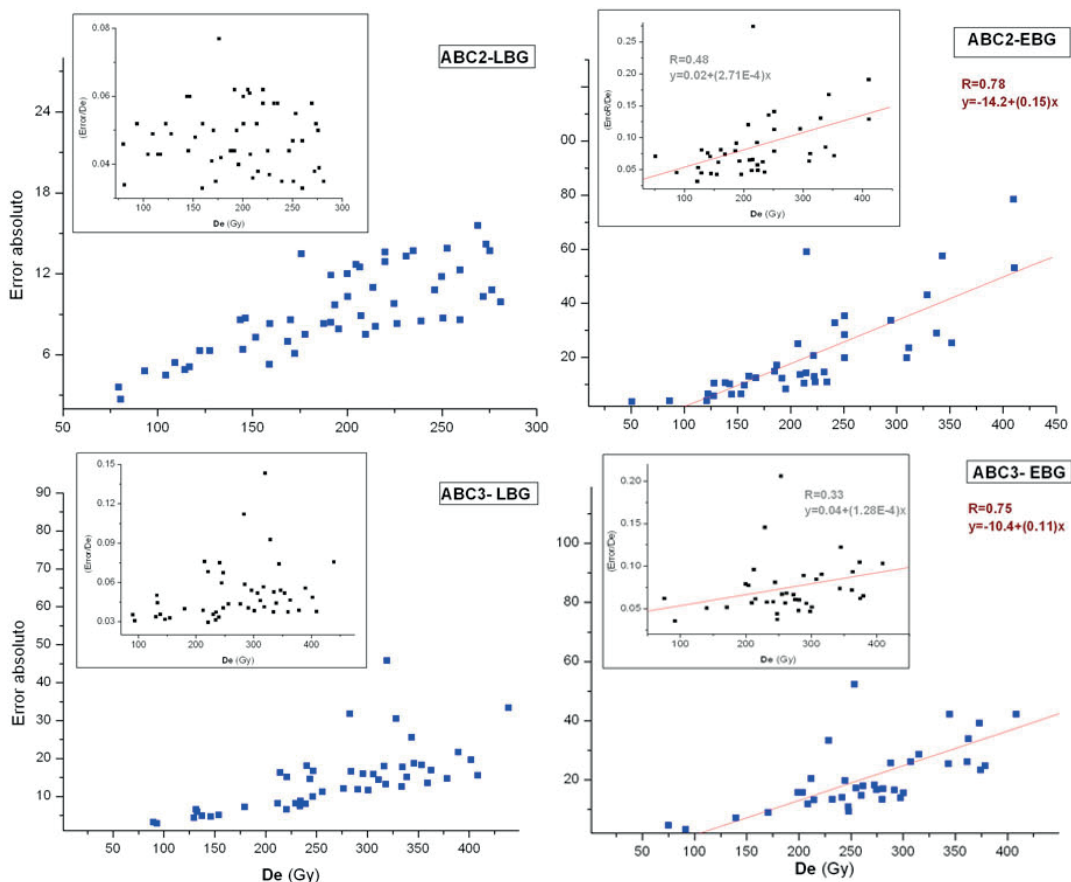




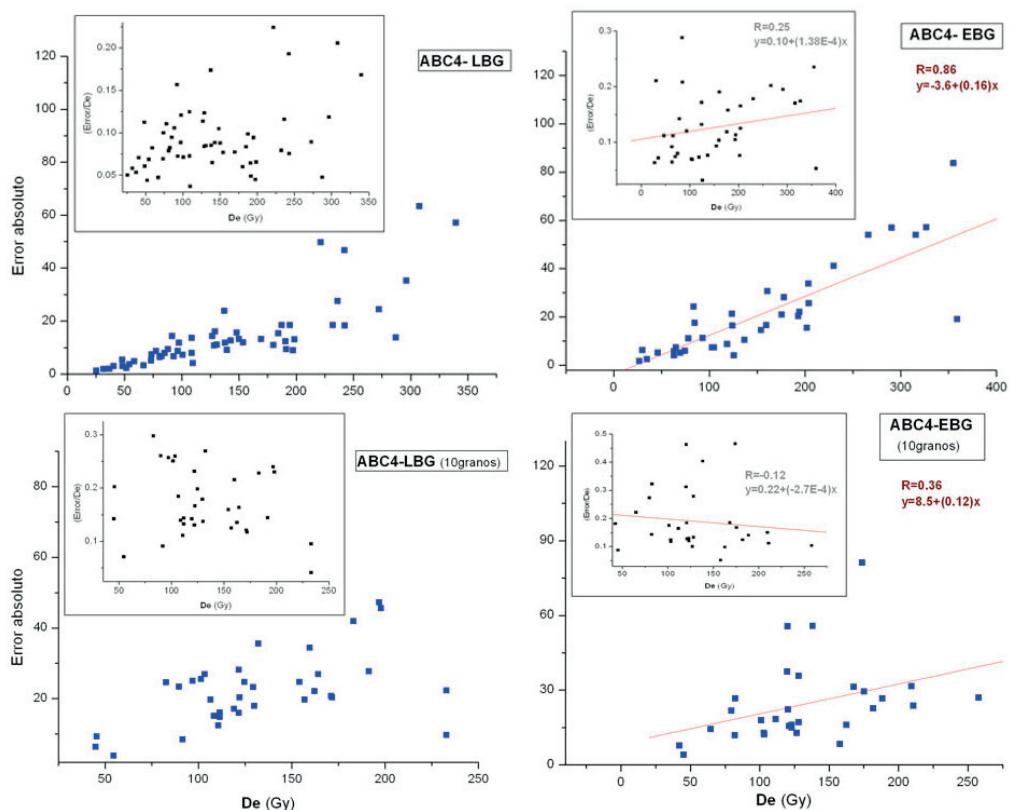
**Figura 8.3.4.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras MPK7 y MPK8, a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.



**Figura 8.3.5.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras ABC1 (con un tamaño de alícuota de 100 granos (arriba) y de 10 granos (abajo), a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.



**Figura 8.3.6.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras ABC2 y ABC3, a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.



**Figura 8.3.7.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras ABC4 (con un tamaño de alícuota de 100 granos (arriba) y de 10 granos (abajo), a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). Para el método EBG se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.

El coeficiente de regresión (R) y la pendiente de la recta obtenidas a partir del ajuste de tipo lineal llevado a cabo entre el error absoluto y el error relativo que presenta cada una de las alícuotas aceptadas mediante el método EBG frente a su estimación de la De, se representa en la tabla (Tabla 10). Para las muestras MPK, los coeficientes son, generalmente inferiores a 0.80 y la pendiente de la recta, por debajo de 0.40, a excepción de MPK6, con  $R=0.81$  y una pendiente de 0.34, muestra que, como se verá más adelante, presenta el mayor porcentaje de sobre-dispersión entre las alícuotas aceptadas para la estimación de la De. Para las muestras ABC, los coeficientes obtenidos con un tamaño de alícuota de 100 granos, oscilan entre 0.86 y 0.75, con pendientes por debajo de 0.17. Para las muestras ABC1 y ABC4, con un tamaño de alícuota de 10 granos, estos coeficientes son de 0.33 y 0.33, con pendientes de 0.09 y 0.12 respectivamente. Así, aunque se aprecia una ligera tendencia, se puede asumir independencia entre la dosis y el error. En la misma tabla, el error relativo

asociado a cada una de las muestras presentan coeficientes de correlación ( $R$ ) por debajo de 0.5, con una pendiente poco pronunciada y, en ocasiones, de signo negativo (como ocurre con la muestra MPK4 o con las muestras ABC1\* y ABC4\* a partir de un tamaño de alícuota de 10 granos. Según estos resultados no se puede establecer una correlación de tipo lineal clara. Respecto a las líneas de tendencia se observa un aumento del error absoluto en función de la dosis, si bien, este incremento se atenúa e incluso cambia a signo negativo (muestras MPK1, MPK3, ABC1 o ABC4\* (esta última con un tamaño de alícuota de 10 granos) cuando se realiza un ajuste lineal entre el error relativo y la  $D_e$ , por lo que la proporción del error resulta, para estas muestras, un parámetro poco dependiente de la dosis.

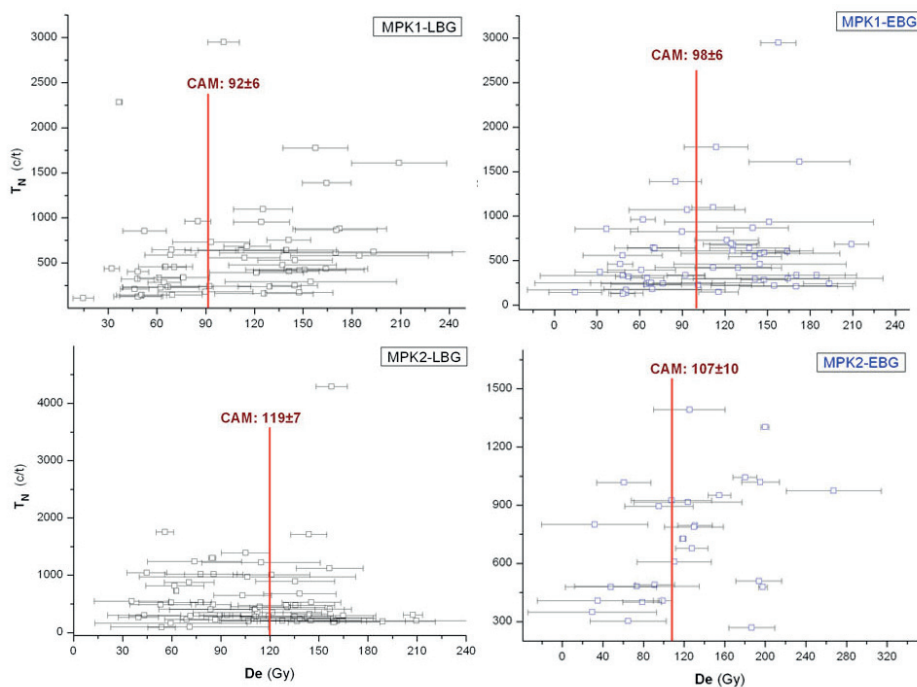
**Tabla 10.** Coeficiente de correlación lineal ( $R$ ) y de regresión (pendiente de la recta) obtenidos a partir del ajuste de tipo lineal ( $y=b+ax$ ) para el error absoluto y el error relativo a partir de las alícuotas aceptadas mediante el método EBG, para las muestras MPK y ABC. (\*) Para ABC1 y ABC4 también se analizan estos parámetros con un tamaño de alícuota de 10 granos.

MUESTRA	Error Absoluto - EBG		Error Relativo - EBG	
	R	Pte.	R	Pte.
MPK1	0,55	0,25	-0,05	<-0,01
MPK2	0,51	0,24	0,06	<0,01
MPK3	0,51	0,24	0,16	<-0,01
MPK4	0,71	0,28	0,27	<-0,01
MPK5	0,58	0,38	0,16	<0,01
MPK6	0,81	0,34	0,39	<0,01
MPK7	0,66	0,27	0,23	<0,01
MPK8	0,61	0,20	0,39	<0,01
ABC1	0,83	0,14	0,12	<-0,01
ABC1*	0,33	0,09	-0,20	<-0,01
ABC2	0,78	0,15	0,48	<0,01
ABC3	0,75	0,11	0,33	<0,01
ABC4	0,86	0,16	0,25	<0,01
ABC4*	0,36	0,12	-0,12	<-0,01

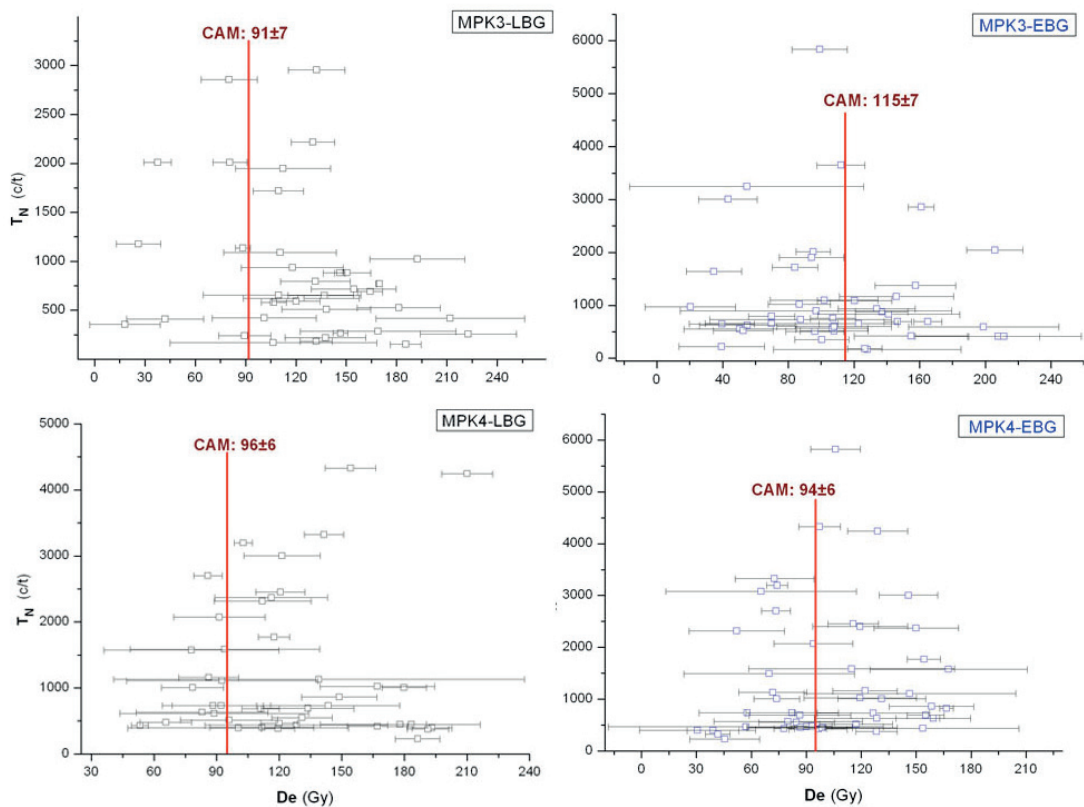
#### 8.1.2.4. Señal OSL de normalización o *Test-dose*.

La señal OSL natural del *Test-dose* ( $T_N$ ) presenta, de forma generalizada, una intensidad similar para las muestras MPK y ABC. Para MPK, empleando una dosis para el *Test-dose* ( $D_{TX}$ ) de 96Gy, el número de cuentas por unidad de tiempo se ubica generalmente por debajo de 2000(c/t), a excepción de MPK8, en donde se observan valores que llegan hasta 15.000(c/t). Para ABC ( $D_{TX}=60$ Gy), las muestras ABC1, ABC2 y ABC3, los valores máximos llegan hasta 10.000(c/t) mientras que para ABC4 no superan las 5000(c/t) (Fig. 8.4.1, 8.4.2, 8.4.3, 8.4.4, 8.4.5, 8.4.6 y 8.4.7) -para los tamaños de alícuota de 10 granos empleados en las muestras ABC1 y

ABC4 no se superan las 2500(c/t). Estos valores descritos, con una señal  $T_N$  de intensidad baja, describen muestras con una baja sensibilidad a la luminiscencia, ya que un incremento en los valores de la señal natural del *Test-dose* ( $T_N$ ) se asocia a muestras más sensibles y esta, a su vez, con una mayor precisión estadística. Para las muestras ABC y como ocurre con la señal natural  $L_N$ , para la señal  $T_N$  ( Fig. 8.4.5, 8.4.6 y 8.4.7) se observa una amplia dispersión, sin un patrón definido, con valores que no se agrupan en torno a la  $De$  promediada mediante el modelo CAM y con un rango de error muy variable que puede llegar a alcanzar grandes proporciones a medida que la dosis aumenta, aspecto que resulta más evidente al emplear el método EBG, así como para los tamaños de alícuota de 10 granos en ABC1 y ABC4.

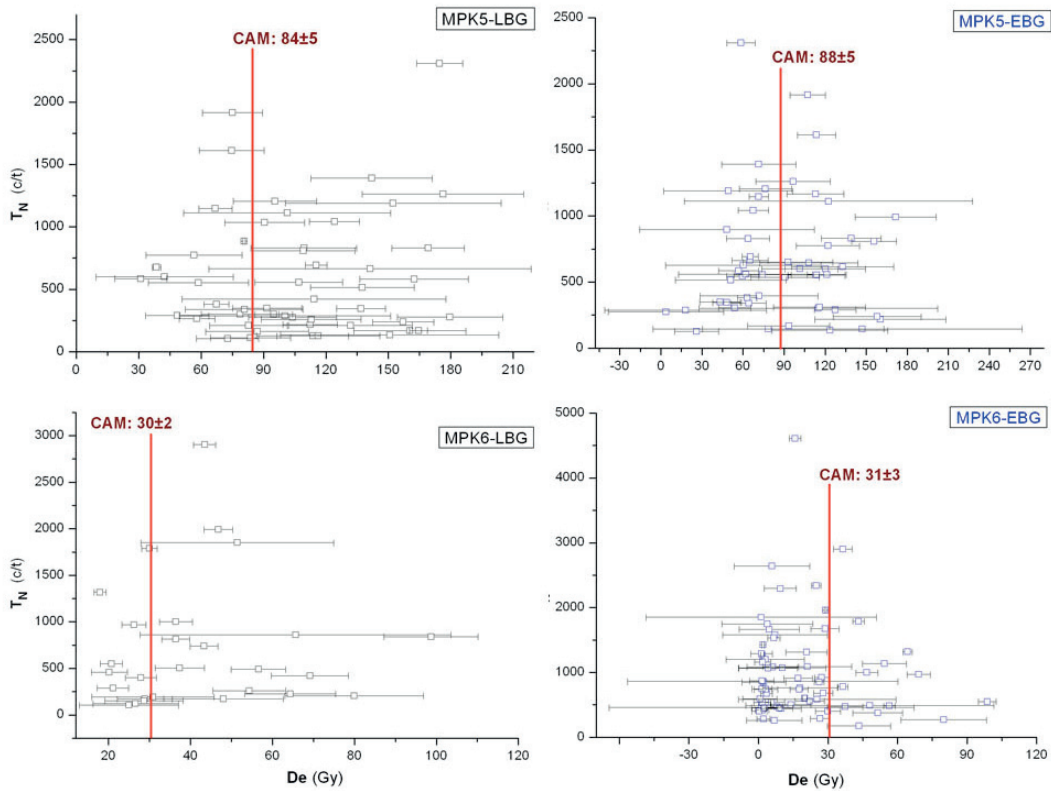


**Figura 8.4.1.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras MPK1 y MPK2. También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.

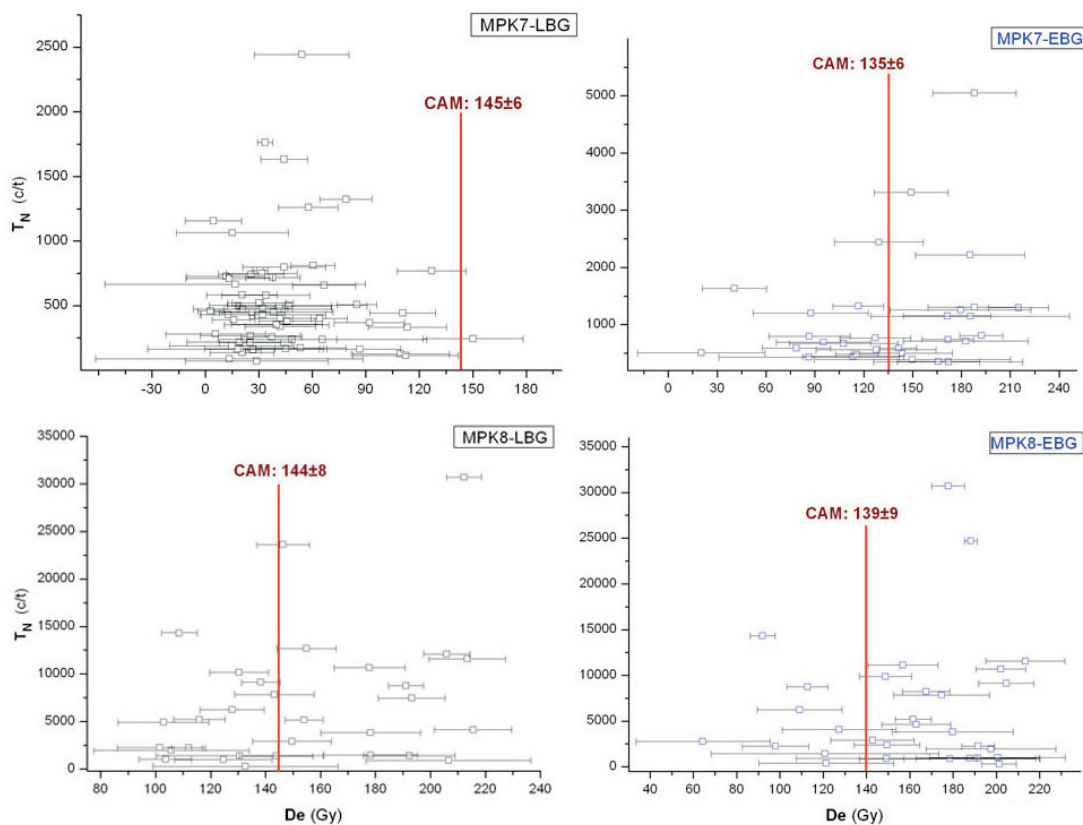


**Figura 8.4.2.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras MPK3 y MPK4. También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.

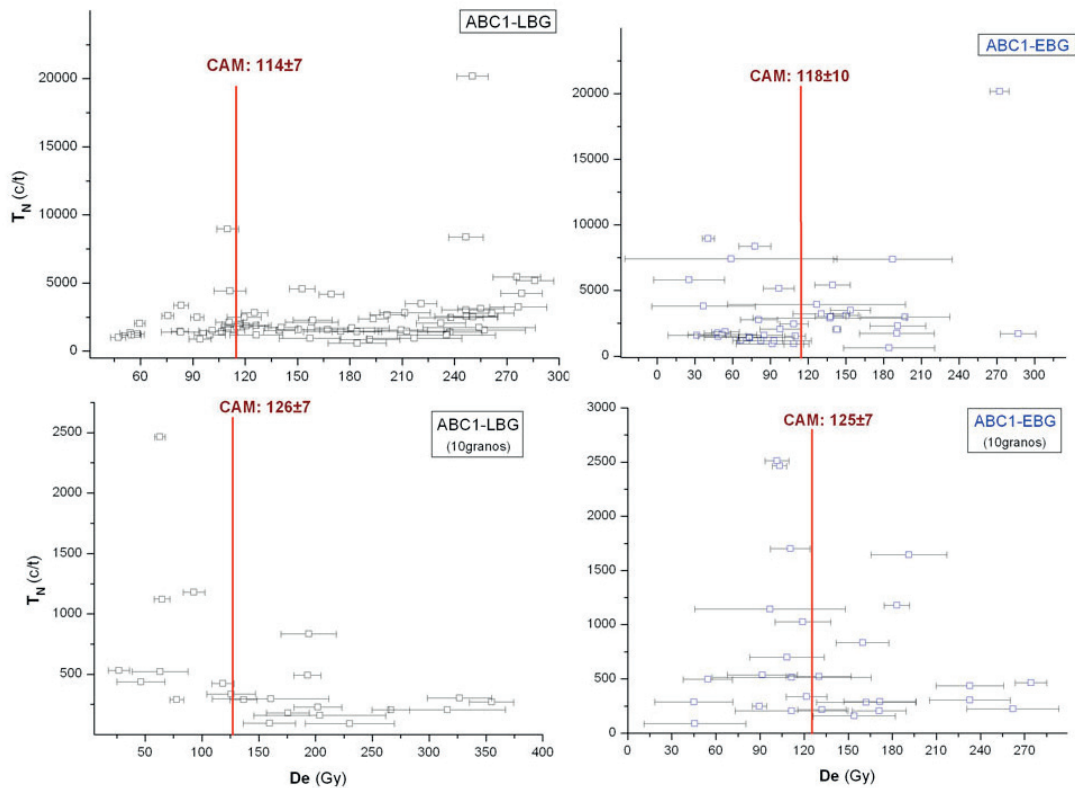




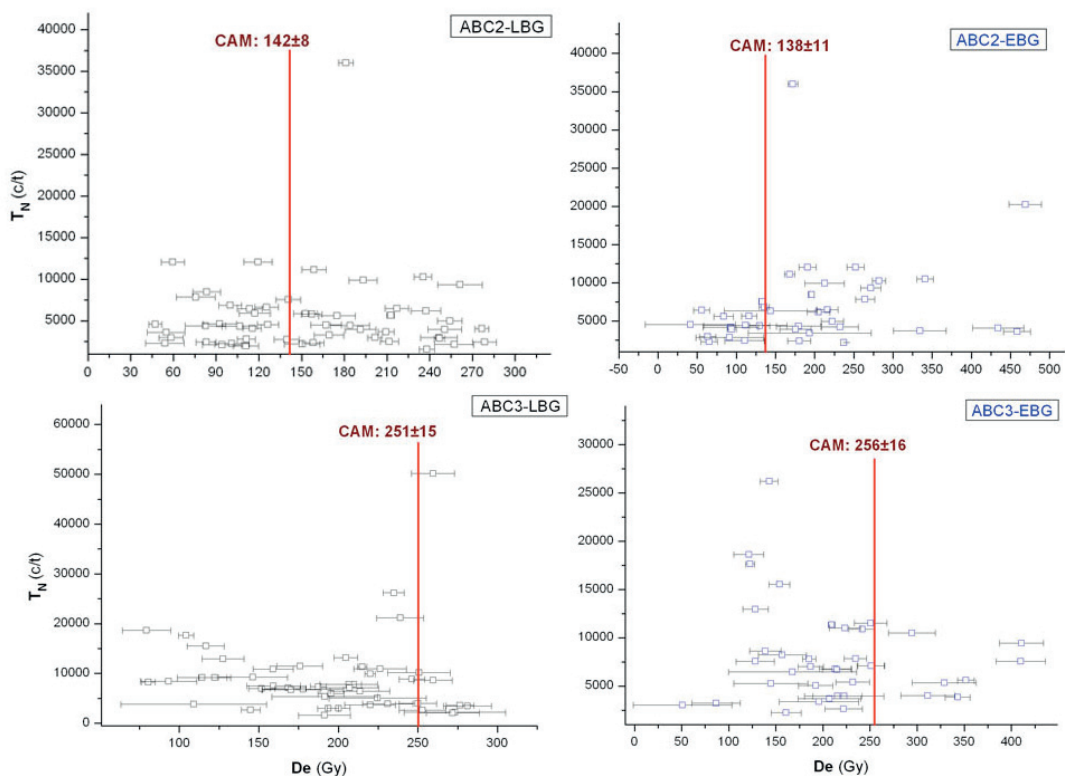
**Figura 8.4.3.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alicuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras MPK5 y MPK6. También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.



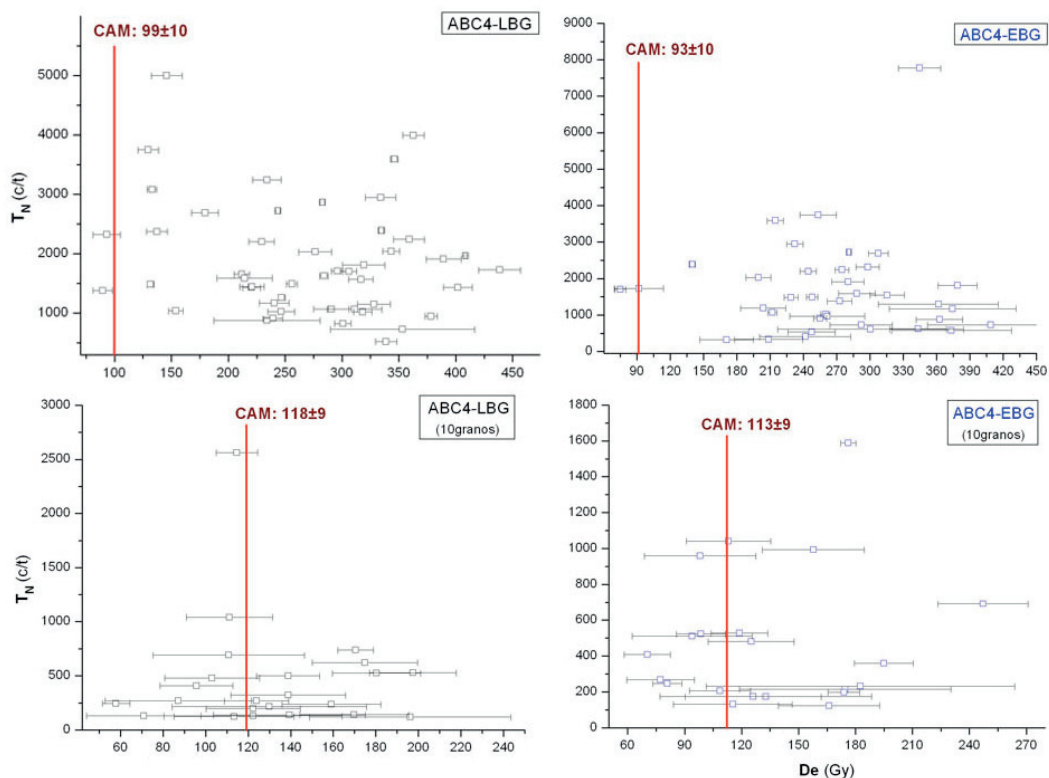
**Figura 8.4.4.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras MPK7 y MPK8. También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.



**Figura 8.4.5.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras ABC1, con un tamaño de alícuota de 100 granos (arriba) y de 10 granos (abajo). También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.



**Figura 8.4.6.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras ABC2 y ABC3. También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.

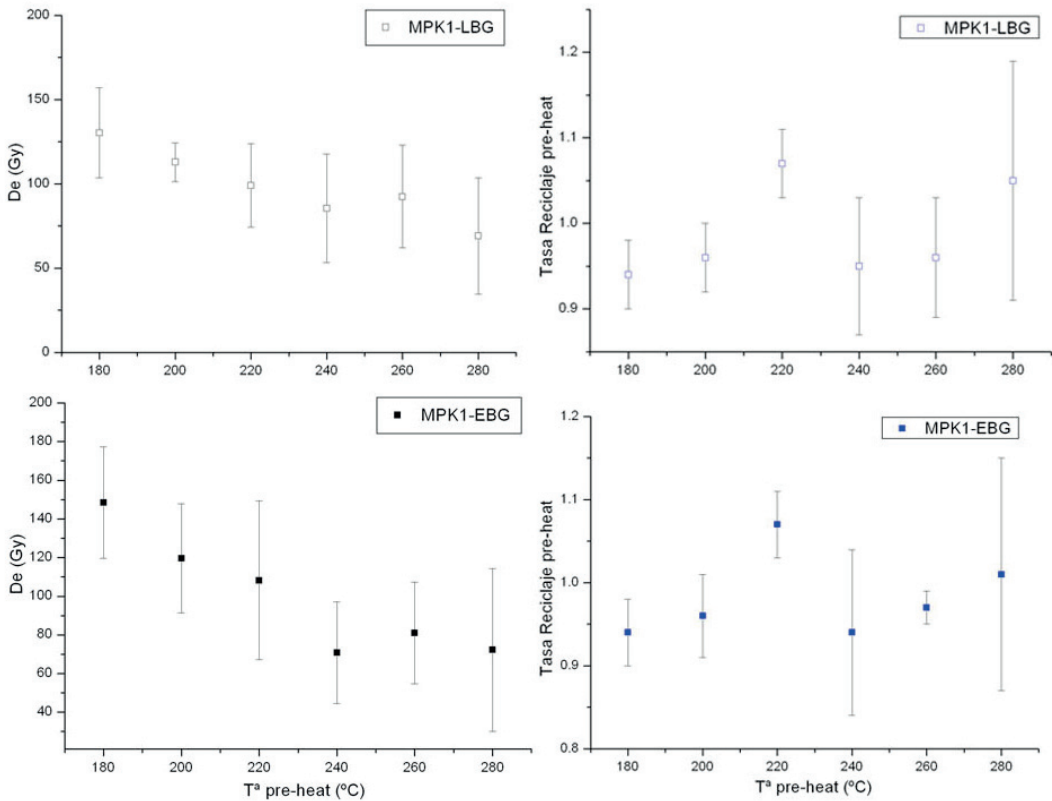


**Figura 8.4.7.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del Test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras ABC4, con un tamaño de alícuota de 100 granos (arriba) y de 10 granos (abajo). También se indica la estimación de la  $De$ (Gy) aplicando el modelo CAM.

#### 8.1.2.5. Test de *pre-heat*.

En las figuras (Fig. 8.5.1, 8.5.2, 8.5.3, 8.5.4 y 8.5.5) se describen los resultados que proporciona el test de *pre-heat* para la señal OSL extraída al emplear los métodos de integración LBG y EBG para las muestras MPK y ABC -las muestras MPK vienen representadas por las muestras MPK1, MPK4 y MPK8, y las muestras ABC, por las muestras ABC1 y ABC4. En estas figuras se representa, por un lado, la  $De$  promedio estimada para cada tratamiento térmico, y por otra parte la tasa de reciclaje correspondiente a cada una de estas estimaciones – la tasa de recuperación se obvia debido a los resultados óptimos obtenidos, con valores entre el 0 y el 1%.

En general, para las muestras MPK, las temperaturas en las cuales la dosis se estabiliza y presenta una región “plateau”, reduciéndose las variaciones, tiende a ubicarse entre 240 y 280°C, si bien, para 260°C disminuye la tasa de reciclaje, motivo por el cual se selecciona esta temperatura para el tratamiento térmico de *pre-heat* en el SAR. Respecto a las muestras ABC1 y ABC4, se produce una menor variabilidad en las estimaciones de la De entre 180 y 200°C, rangos de temperatura donde se observan mejores resultados a efecto de reciclaje de la señal, con tasas entre 0.9 y 1.1, por lo que se selecciona una temperatura de *pre-heat* de 200°C para aplicar el protocolo SAR en este conjunto de muestras ABC. Además, y como se puede observar en las mismas figuras, las estimaciones y la tasa de reciclaje obtenida para cada uno de los tratamientos térmicos a partir del método LBG y a partir del método EBG son muy similares.



**Figura 8.5.1.** De promedio en función de la temperatura de *pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para la muestra MPK1, empleando los métodos de integración de la señal LBG (arriba) y EBG (abajo).

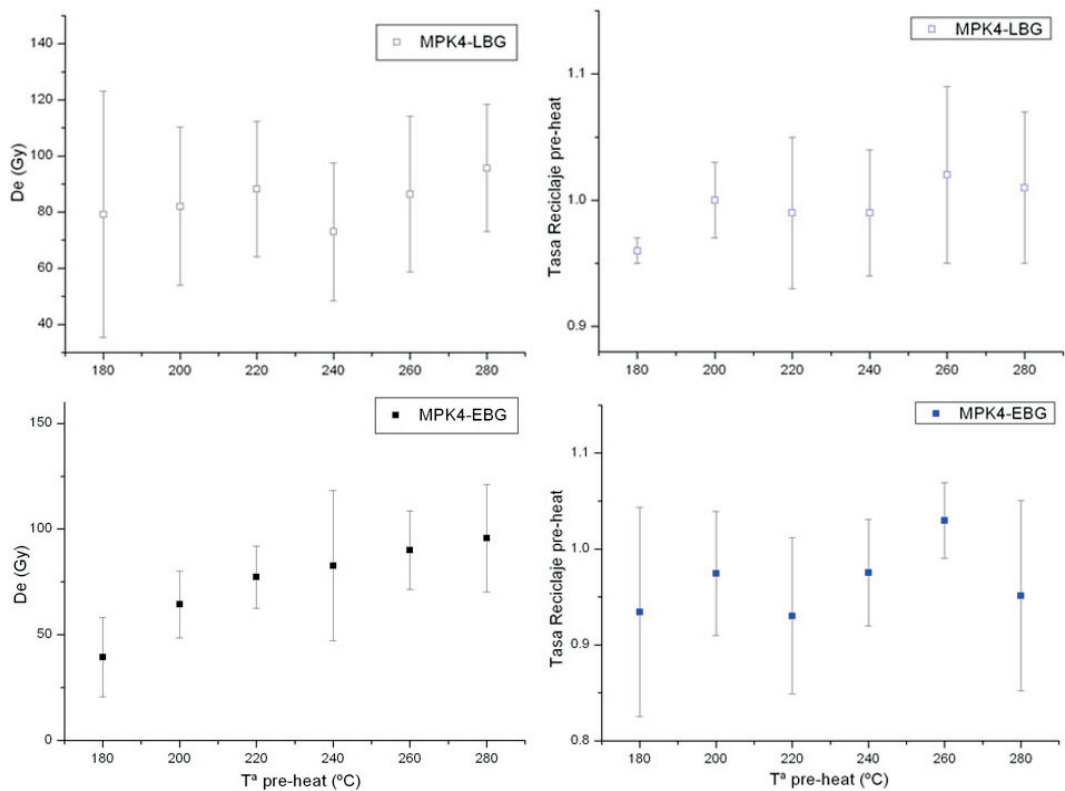
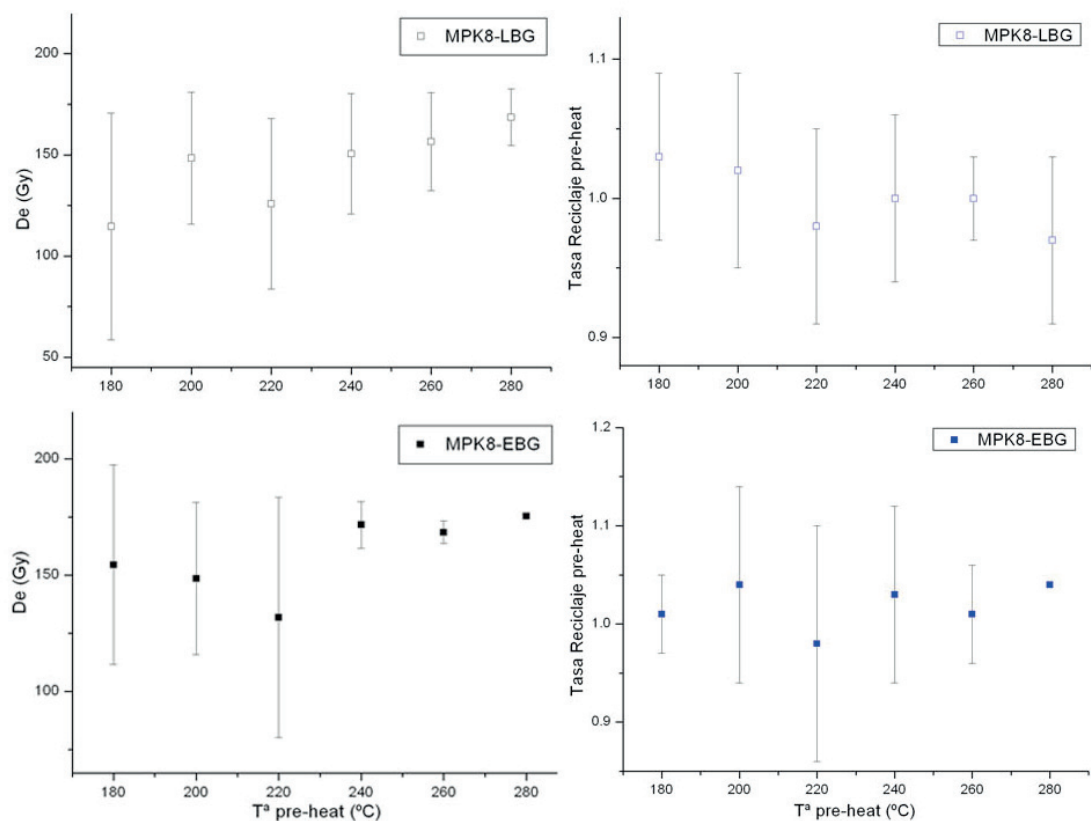


Figura 8.5.2.  $De$  promedio en función de la temperatura de *pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para la muestra MPK4, empleando los métodos de integración de la señal LBG (arriba) y EBG (abajo).





**Figura 8.5.3.**  $De$  promedio en función de la temperatura *de pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para la muestra MPK8, empleando los métodos de integración de la señal LBG (arriba) y EBG (abajo).

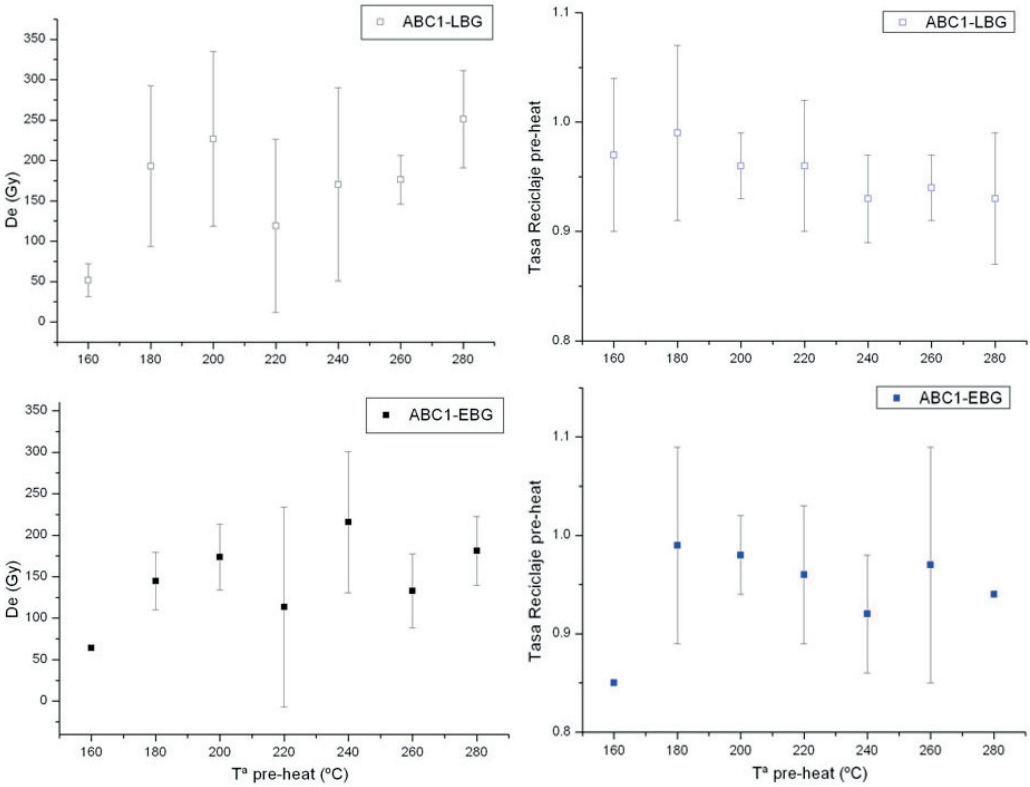
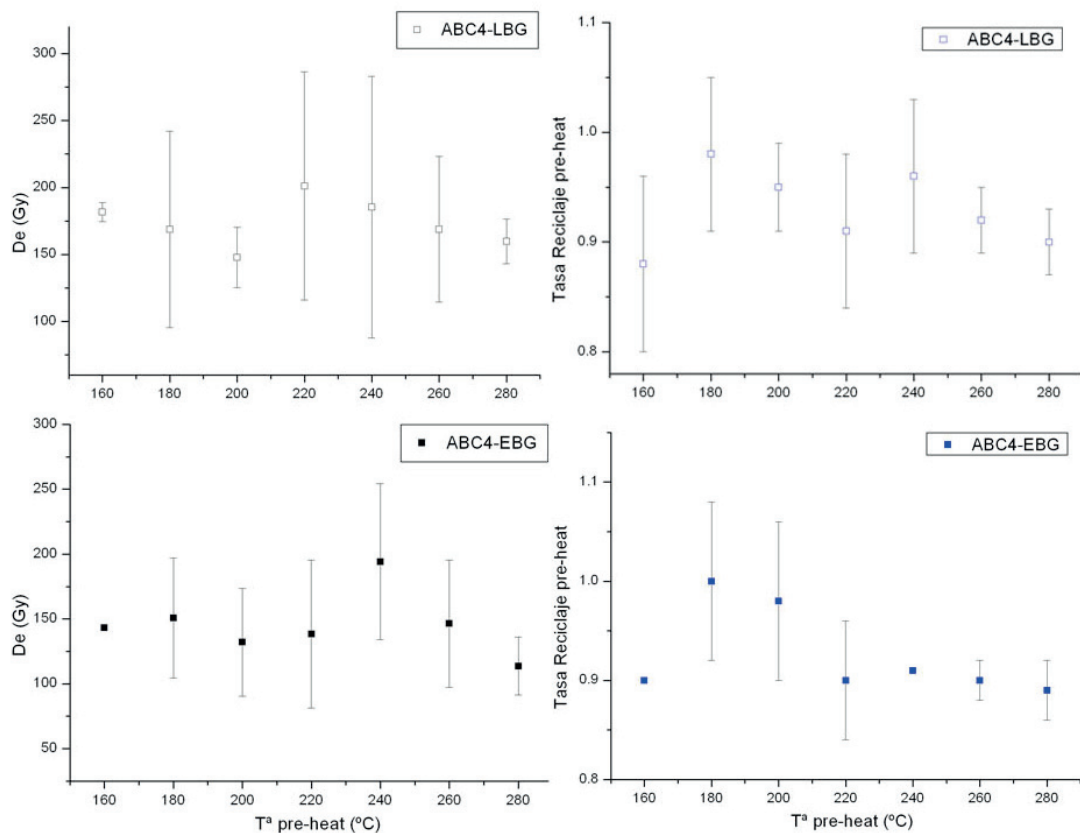


Figura 8.5.4.  $D_e$  promedio en función de la temperatura de *pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para la muestra ABC1, empleando los métodos de integración de la señal LBG (arriba) y EBG (abajo).



**Figura 8.5.5.**  $De$  promedio en función de la temperatura de *pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para la muestra ABC4, empleando los métodos de integración de la señal LBG (arriba) y EBG (abajo).

#### 8.1.2.6. Test de adecuación del protocolo SAR: *Dose-recovery test*.

El test *Dose-recovery* es una prueba de idoneidad del protocolo SAR (ver apartado 3.4.4.) que compara la dosis equivalente estimada a partir de la señal OSL (o IRSL) con una dosis inducida, previo blanqueamiento de la misma. Así, si el ratio entre esta dosis inducida ( $De'$ ) y la dosis equivalente ( $De$ ) se ubica entre un 0.9 y un 1.1 (en tanto por uno) puede establecerse como apropiada y satisfactoria la aplicación de este protocolo SAR para una estimación de la dosis a lo largo del tiempo de enterramiento para el cálculo de un rango de edad.

En la tabla (Tabla 11) se describen los resultados obtenidos para este test, a partir de la señal OSL extraída mediante los métodos de integración LBG y EBG para las muestras MPK y para las muestras ABC –para estas últimas solo se describen los datos obtenidos a partir del método EBG debido a su similitud con los obtenidos mediante el método LBG. El número de alícuotas empleado es variable, entre 14 y 32, y la dosis artificial irradiada es, para las muestras MPK de 84Gy, mientras que para ABC1 y ABC2 es de 129Gy, para ABC3 de 192 y para ABC4 de 96Gy. El ratio obtenido ( $De'/De$ ) se incluyen dentro de los criterios de aceptación del test para cada una de las muestras analizadas, por lo que la aplicación del protocolo SAR para estas muestras permite una estimación de la  $De$  próxima a la esperada, confirmando su idoneidad.

Por otra parte, los porcentajes de sobre-dispersión ( $OD$ ) estimados se sitúan por debajo del 10%, a excepción de la muestra ABC2, con un  $12\pm 4\%$ . Teniendo en cuenta que en este test, la señal OSL medida ha sido regenerada por irradiación beta después del blanqueo de la señal OSL natural, la incertidumbre asociada a factores extrínsecos, como blanqueamiento incompleto de la señal OSL o heterogeneidad en la microdosimetría beta, queda eliminada, por lo que la  $OD$  estimada en este test del *Dose-recovery* se debe únicamente a factores intrínsecos, como estadística de cuentas, ajuste a la curva de crecimiento, reproducibilidad instrumental o contribución de las componentes media y lenta de la señal OSL, etc. Sin embargo, los porcentajes de  $OD$  estimados para cada una de las muestras que están generalmente por debajo del 10% e incluso del 5%, presentando valores muy bajos si se compara con el porcentaje de  $OD$  estimado para el cálculo del rango de edad de enterramiento para las muestras MPK y ABC (ver apartado 8.1.3. y Tabla 16) y que, en ocasiones, supera el 50%, aspectos que se discutirán más adelante.

**Tabla 11.** Resultados del test *Dose-recovery* para las muestras MPK (a partir del método LBG y EBG) y las muestras ABC (a partir del método EBG), de las cuales se ha extraído la señal OSL. Se incluye además el número de alícuotas (N) que superan los criterios de aceptación (test de recuperación y reciclaje, y buen ajuste a la curva de crecimiento), la *De* (Gy) estimada empleando el modelo CAM (que ofrece además el porcentaje estimado de sobre-dispersión (*OD*) y el ratio promedio al dividir la *De* estimada entre la *De* inducida (*De'*) con la dosis inducida.

Muestras Señal OSL	N	De CAM (Gy)	De' (Gy)	Ratio De'/De	OD (%)
MPK1-LBG	29	87.19±2.50	84	1.03±0.09	<5%
MPK1-EBG	25	87.86±3.07	84	1.04±0.09	<5%
MPK2-EBG	18	93.04±4.56	84	1.08±0.10	<5%
MPK2-LBG	32	90.29±3.13	84	1.07±0.08	<5%
MPK3-EBG	23	90.89±3.57	84	1.07±0.08	<5%
MPK3-LBG	30	87.41±3.66	84	1.05±0.10	<5%
MPK4-EBG	15	87.43±4.57	84	1.06±0.10	6±1
MPK4-LBG	18	87.41±3.66	84	1.03±0.12	<5%
MPK5-EBG	17	90.57±5.17	84	1.05±0.12	<5%
MPK5-LBG	17	87.36±4.91	84	1.01±0.11	<5%
MPK7-LBG	25	87.19±4.30	84	1.02±0.09	<5%
MPK7-EBG	22	86.18±3.65	84	1.08±0.10	<5%
MPK8-LBG	24	85.20±2.59	84	1.01±0.10	7±3
MPK8-EBG	23	86.28±2.54	84	1.03±0.11	<5%
ABC1-EBG	18	115.06±4.58	120	0.98±0.10	8±3
ABC2-EBG	14	114.23±6.54	120	0.96±0.25	12±4
ABC3-EBG	14	190.74±5.12	192	1.00±0.04	<5%
ABC4-EBG	18	106.18±4.53	96	1.05±0.11	<5%

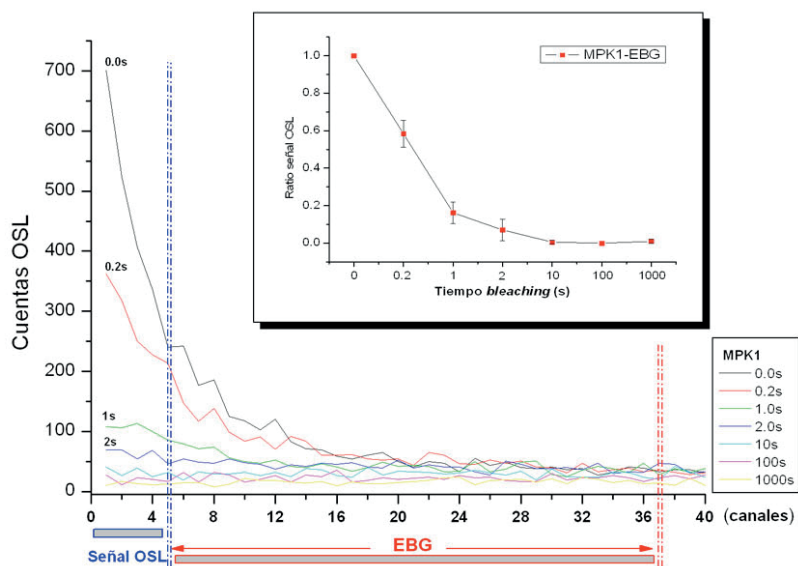
#### 8.1.2.7. Test de blanqueamiento de la señal OSL: *Bleaching test*.

Cuando se aplican distintos tiempos de blanqueamiento de la señal OSL después de inducir una dosis beta (300Gy) (ver apartado 7.6.6.) la intensidad de la misma, como es previsible, decrece. En las figuras (Fig. 8.6.1, 8.6.2 y 8.6.3) se representa la curva de caída de la señal OSL en número de cuentas para cada uno de los tiempos de blanqueamiento y a lo largo de los primeros 40 canales (de un total de 4000 canales correspondiente a 500 segundos de estímulo lumínico), para las muestras MPK1, MPK4 y MPK6, como representativas del conjunto de muestras MPK, y para las muestras ABC1 y ABC4 como representativas del conjunto de muestras ABC. En estas figuras también se representa el intervalo correspondiente a la señal

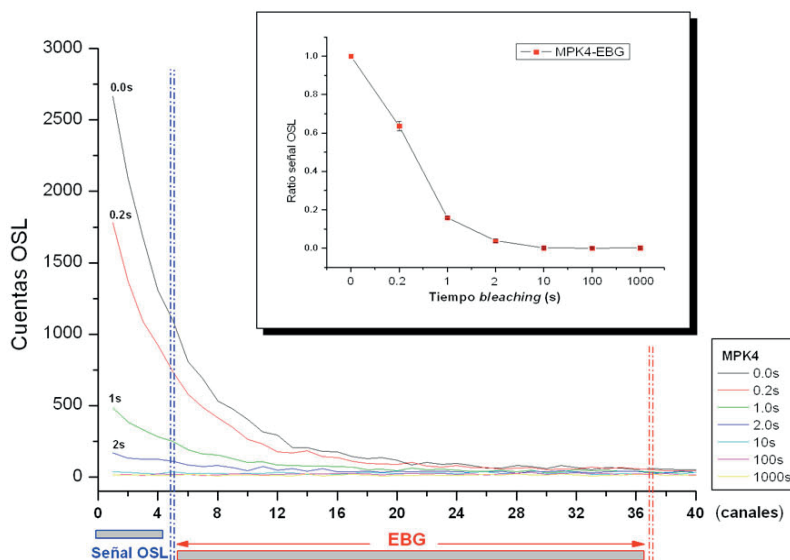
rápida OSL -entre 1 y 4 canales, lo que equivaldría a 0.5segundos- y la señal de fondo EBG -ubicada entre 5 y 37 canales, es decir, 4 segundos. Además, se incluye un recuadro interno en el que se representa, de manera proporcional, el ratio promedio de la señal OSL obtenida mediante el método EBG con su desviación típica, para cada tiempo de blanqueamiento.

Como se puede observar en las mismas figuras, el número de cuentas cae a valores de fondo una vez transcurrido 1s de blanqueamiento, en lo que respecta a cuentas OSL. También se puede observar, en el recuadro interno de estas figuras, la proporción de señal que desaparece entre la señal sin blanqueamiento alguno (0s) y transcurridos los distintos tiempos de blanqueamiento (0.2s, 1s, 2s, 10s, 100s y 1000s) para la muestra representada, decreciendo entre un 80% y un 90% tras 1s de blanqueamiento.

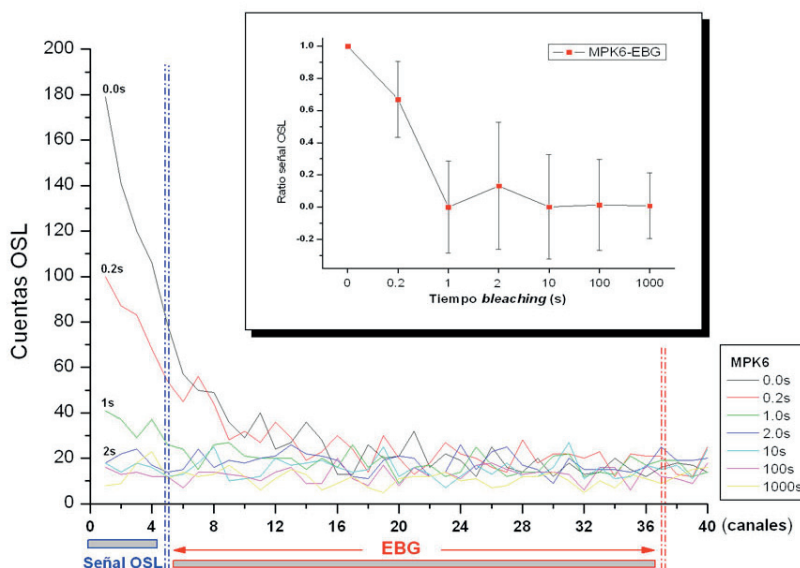
Por su parte, en las figuras (Fig. 8.6.4 y 8.6.5) se representa las proporciones de señal blanqueada (ratios promedio) que presentan las muestras MPK para la señal OSL integra, es decir, de la que no se ha extraído una señal de fondo, así como para la señal OSL de la cual se ha extraído la señal de fondo mediante el método LBG y la señal OSL de la cual se ha extraído la señal de fondo mediante el método EBG, a modo comparativo, e incluyendo también, la proporción de la señal que desaparece en función del tiempo de blanqueamiento de la propia señal de fondo EBG, es decir, el número de cuentas integrado dentro del intervalo correspondiente a la señal de fondo que al aplicar el método EBG.



**Figura 8.6.1.** Curva de caída para la señal OSL natural en cuentas por unidad de tiempo (ejeY) correspondientes a los 40 primeros canales (eje X), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (0.0s; 0.2s; 1.0s; 2.0s; 10s; 100s; 1000s) para la muestra MPK1. En el recuadro interno se representa la señal OSL extraída mediante el método EBG en forma de ratio promediado y su desviación típica (ejeY), para cada uno de los tiempo de blanqueamiento o *bleaching* (eje X).

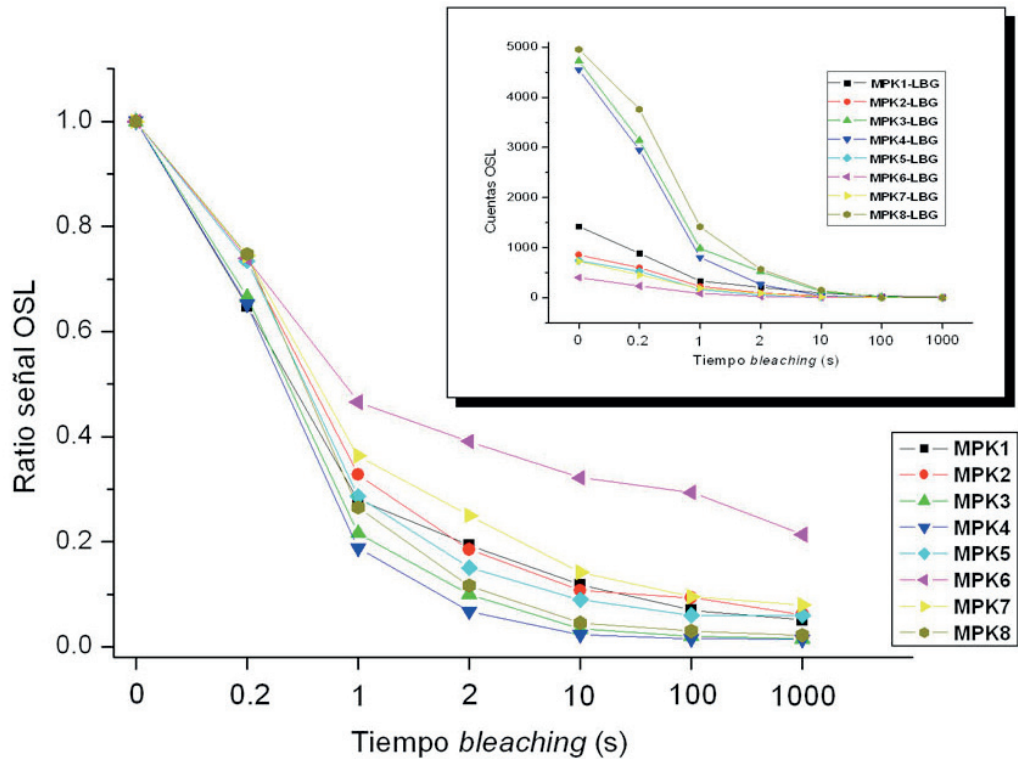


**Figura 8.6.2.** Curva de caída para la señal OSL natural en cuentas por unidad de tiempo (ejeY) correspondientes a los 40 primeros canales (eje X), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (0.0s; 0.2s; 1.0s; 2.0s; 10s; 100s; 1000s) para la muestra MPK4. En el recuadro interno se representa la señal OSL extraída mediante el método EBG en forma de ratio promediado y su desviación típica (ejeY), para cada uno de los tiempo de blanqueamiento o *bleaching* (eje X).

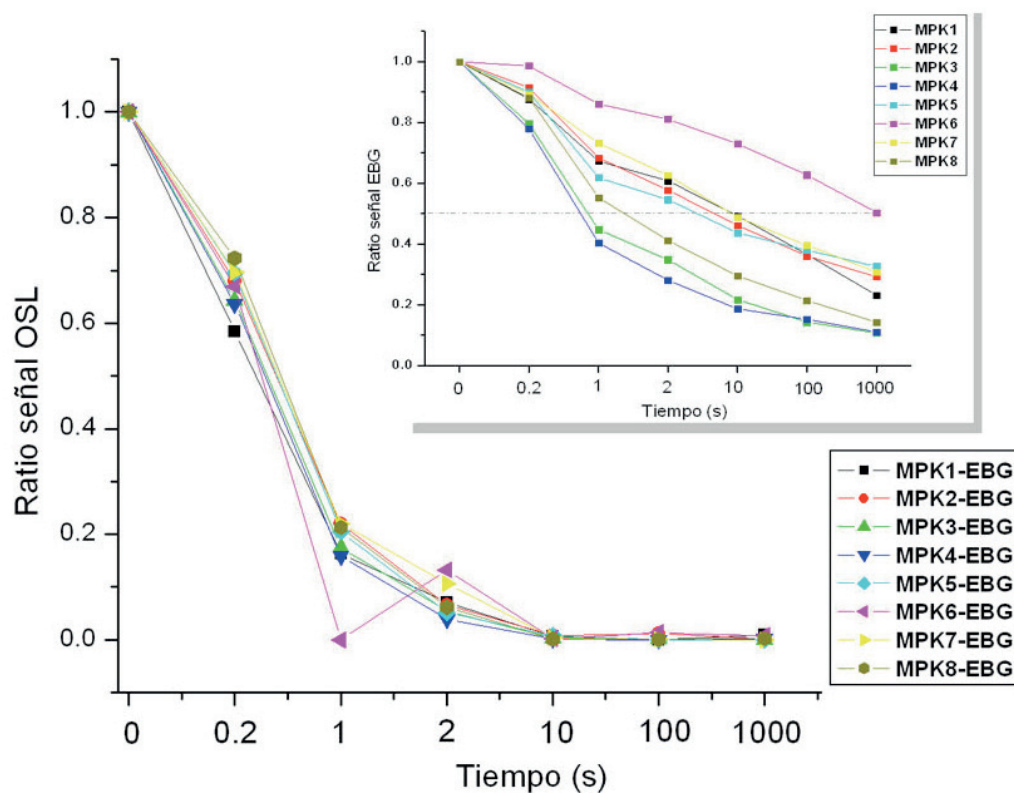


**Figura 8.6.3.** Curva de caída para la señal OSL natural en cuentas por unidad de tiempo (ejeY) correspondientes a los 40 primeros canales (eje X), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (0.0s; 0.2s; 1.0s; 2.0s; 10s; 100s; 1000s) para la muestra MPK6. En el recuadro interno se representa la señal OSL extraída mediante el método EBG en forma de ratio promediado y su desviación típica (ejeY), para cada uno de los tiempo de blanqueamiento o *bleaching* (eje X).





**Figura 8.6.4.** Proporción en tanto por uno de la señal OSL natural (c/t) promedio y sin substracción de señal de fondo (eje Y) para cada uno de los tiempos de blanqueamiento o *bleaching* aplicados en segundos (eje X: 0.0s; 0.2s; 1.0s;2.0s; 10s; 100s; 1000s) y para cada una de las muestras MPK. En el recuadro interno se representa la señal OSL obtenida mediante el método LBG (en cuentas/t) para cada uno de los tiempos de blanqueamiento.



**Figura 8.6.5.** Proporción en tanto por uno de la señal OSL natural promediada obtenida mediante el método EBG (eje Y), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (eje X: 0.0s; 0.2s; 1.0s; 2.0s; 10s; 100s; 1000s) y para cada una de las muestras MPK. En el recuadro interno se representa la misma proporción, en tanto por uno, de la señal de fondo OSL promedio aplicando en el método EBG (número de cuentas integrado entre los canales 5 y 37), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento (ejeX). La línea horizontal discontinua indica el 50%.

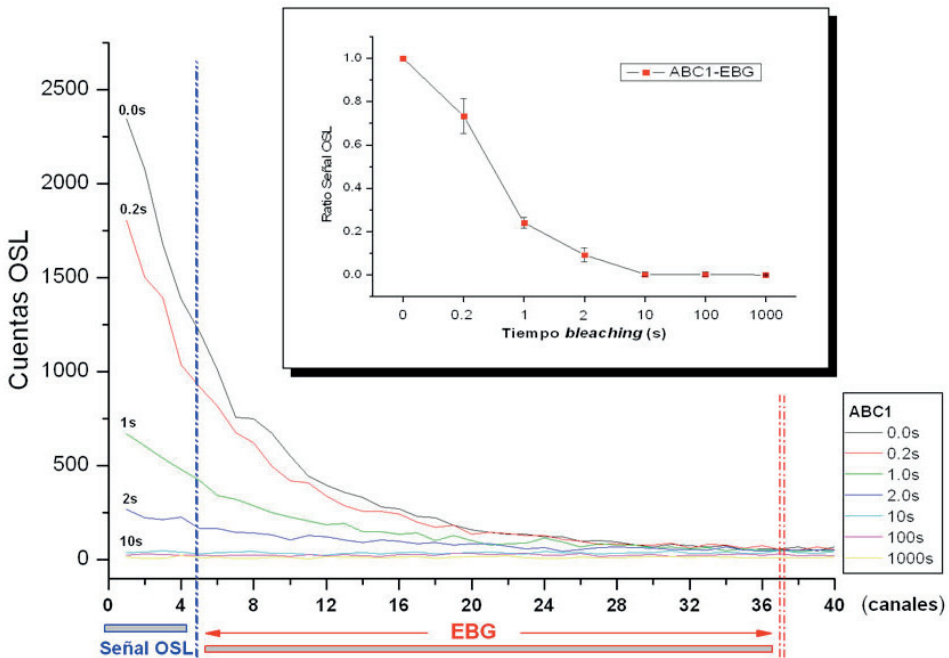
En estas últimas figuras (Fig. 8.6.4 y 8.6.5), el tiempo 0(s) representa la intensidad máxima de esta señal, esto es, el 100% (en la gráfica, en tanto por uno). Como ya se ha comentado, en la figura (Fig. 8.6.4) se representa el ratio promedio de blanqueamiento de la señal OSL sin extraer señal de fondo alguna. Así, al transcurrir 1s de blanqueamiento, la señal OSL de las muestras MPK, y a excepción de MPK6, decrecen entre un 60% y un 80% y, transcurridos 1000s, la señal decrece ya un 90% o más. Para MPK6, la señal resulta más persistente ya que, transcurridos 1s decae un 50% y transcurridos 1000s sólo decae un 30% más. En el recuadro interno se representa el número de cuentas de la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuyos resultados son similares a la señal OSL de la cual no se extrae señal de fondo alguna), si bien, la diferencia más evidente entre las muestras MPK hace referencia a la intensidad de la señal OSL y no tanto a la proporción de ésta que se elimina al aplicar cada uno de los tiempos de blanqueamiento.

Por su parte, en la figura (Fig. 8.6.5), la que se representa la misma proporción de señal OSL que permanece en función del tiempo de blanqueamiento pero de la cual se ha extraído una señal de fondo mediante el método EBG, cuando transcurre 1s de tiempo de blanqueamiento esta señal OSL-EBG decrece un 80% o más, y transcurridos 1000s, esta decrece, para todas las muestras e incluida la muestra MPK6, más del 95%. Empleando el método EBG se está sustrayendo parte de la señal OSL correspondientes a las componentes media y lenta que, en caso de no extraer señal de fondo o emplear el método LBG, están presentes al aplicar los tiempos de blanqueamiento más elevados de este test.

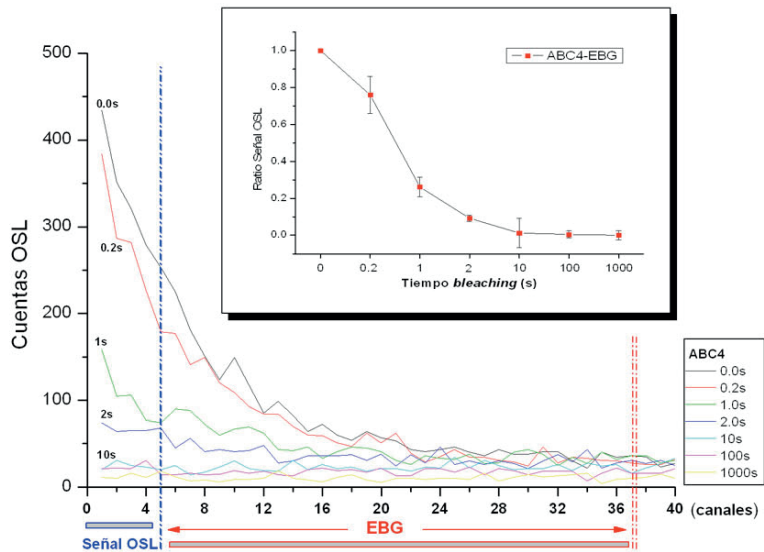
En el recuadro interior de la misma figura se representa, además, el comportamiento de la señal de fondo EBG para cada uno de los tiempos de blanqueamiento, observándose como esta decrece de manera muy heterogénea entre las distintas muestras MPK. Para las muestras MPK3 y MPK4 esta señal EBG decrece un 60% transcurridos 1s. Para MPK8, esta señal EBG también decrece un 60%, pero transcurridos 2s. Para las muestras MPK1, MPK2, MPK5 y MPK7, la señal EBG decrece un 50% transcurridos 10s y para la muestra MPK6 esta señal EBG decrece un 50% transcurridos 1000s, tiempo de blanqueamiento durante el cual, la señal EBG para el resto de muestras MPK, se ha reducido entre un 70 y un 90%. Así, la señal OSL que proporciona el método EBG minimiza la contribución de esta señal de fondo, correspondientes a las componentes media y lenta que, en comparación con la componente rápida, requieren más tiempo para su blanqueamiento.

Por su parte, los resultados obtenidos en el test de *bleaching* para las muestras ABC se describen en las figuras (Fig. 8.6.6 y 8.6.7) en las cuales se representa la curva OSL de las muestras ABC1 y ABC4, correspondiente a los 40 primeros canales (de 500, es decir, 4000s de estímulo lumínico) para cada uno de los tiempos de blanqueamiento, como representativas del conjunto de muestras ABC, alcanzándose valores de fondo transcurridos 2s.

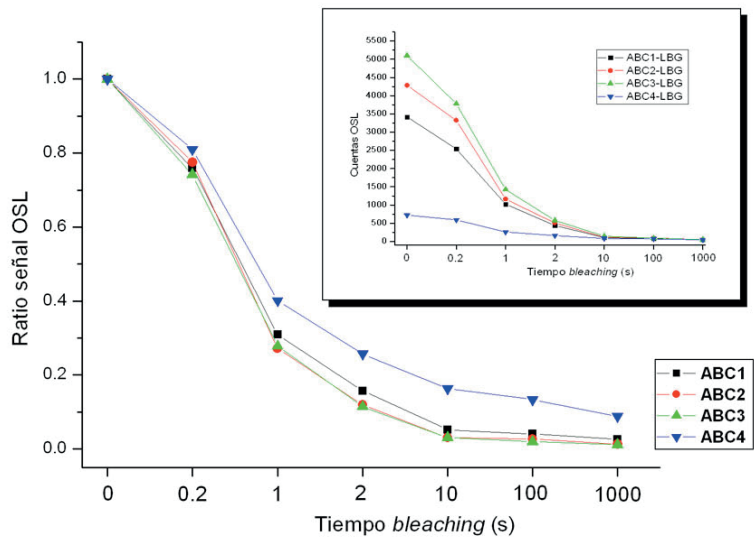
También se representa, para las muestras ABC, el ratio de la señal OSL sin extraer señal de fondo en la figura (Fig. 8.6.8) y el ratio de la señal OSL integrada mediante el método EBG en la figura (Fig. 8.6.9), del mismo modo que se hizo con las muestras MPK. En la primera se puede observar como, transcurridos 1s, la señal OSL decrece un 60%, y al cabo de 10s, la señal, para las muestras ABC1, ABC2 y ABC3 presenta ya valores inferiores al 10% mientras que, para la muestra ABC4, se sitúa entre el 10 y el 20% (en la figura, en tanto por uno). Respecto al ratio de la señal OSL-EBG, al transcurrir 1s la señal decrece ya un 80%, y al cabo de 10s, la señal cae más del 95%. Además, en el recuadro interior de la misma figura (Fig. 8.6.9) se puede observar la proporción de señal de fondo EBG que va desapareciendo a medida que aumenta el tiempo de blanqueamiento. Esta señal EBG de fondo decrece de forma más rápida para las muestras ABC1, ABC2 y ABC3, mientras que, para la muestra ABC4 resulta más recalcitrante, decreciendo algo más de un 20% transcurrido 1s, cuando el resto de muestras ya cae aproximadamente un 50%, valor que alcanza la señal EBG para la muestra ABC4, transcurridos 10s. Al igual que ocurre con las muestras MPK, para ABC también se reduce la contribución de la señal media y lenta aplicando el método de integración EBG.



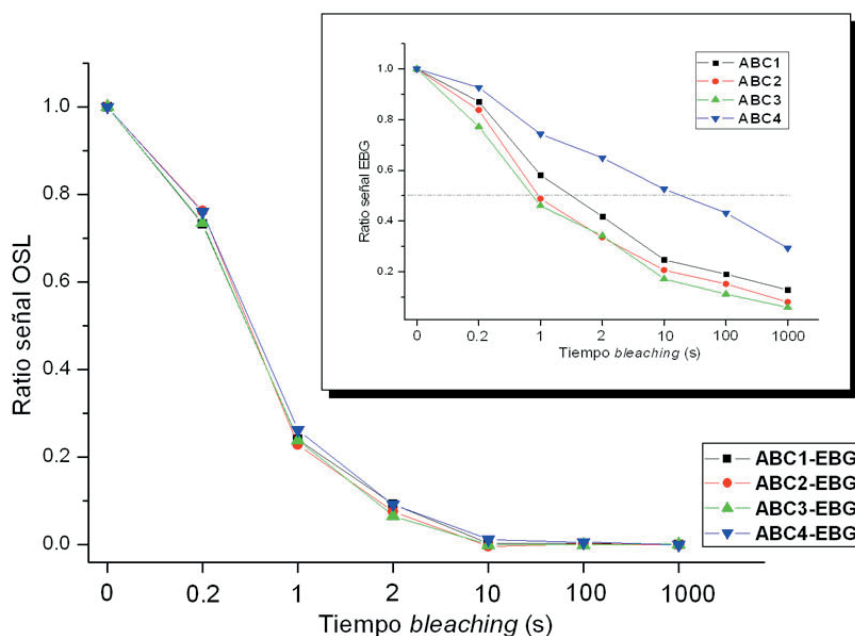
**Figura 8.6.6.** Curva de caída para la señal OSL natural en cuentas por unidad de tiempo (ejeY) correspondientes a los 40 primeros canales (eje X), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (0.0s; 0.2s; 1.0s; 2.0s; 10s; 100s; 1000s) para la muestra ABC1. En el recuadro interno se representa la señal OSL extraída mediante el método EBG en forma de ratio promediado y su desviación típica (ejeY), para cada uno de los tiempo de blanqueamiento o *bleaching* (eje X).



**Figura 8.6.7.** Curva de caída para la señal OSL natural en cuentas por unidad de tiempo (ejeY) correspondientes a los 40 primeros canales (eje X), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (0.0s; 0.2s; 1.0s;2.0s; 10s; 100s; 1000s) para la muestra ABC4. En el recuadro interno se representa la señal OSL extraída mediante el método EBG en forma de ratio promediado y su desviación típica (ejeY), para cada uno de los tiempo de blanqueamiento o *bleaching* (eje X).



**Figura 8.6.8.** Proporción en tanto por uno de la señal OSL natural (c/t) promedio y sin substracción de señal de fondo (eje Y) para cada uno de los tiempos de blanqueamiento o *bleaching* aplicados en segundos (eje X: 0.0s; 0.2s; 1.0s;2.0s; 10s; 100s; 1000s) y para cada una de las muestras MPK. En el recuadro interno se representa la señal OSL obtenida mediante el método LBG para cada uno de los tiempos de blanqueamiento.



**Figura 8.6.9.** Proporción en tanto por uno de la señal OSL natural promediada obtenida mediante el método EBG (eje Y), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento aplicados en segundos (eje X: 0.0s; 0.2s; 1.0s; 2.0s; 10s; 100s; 1000s) y para cada una de las muestras ABC. En el recuadro interno se representa la misma proporción, en tanto por uno, de la señal de fondo OSL promediada aplicando en el método EBG (número de cuentas integrado entre los canales 5 y 37), para cada uno de los tiempos de blanqueamiento (ejeX); la línea horizontal discontinua indica el 50%.

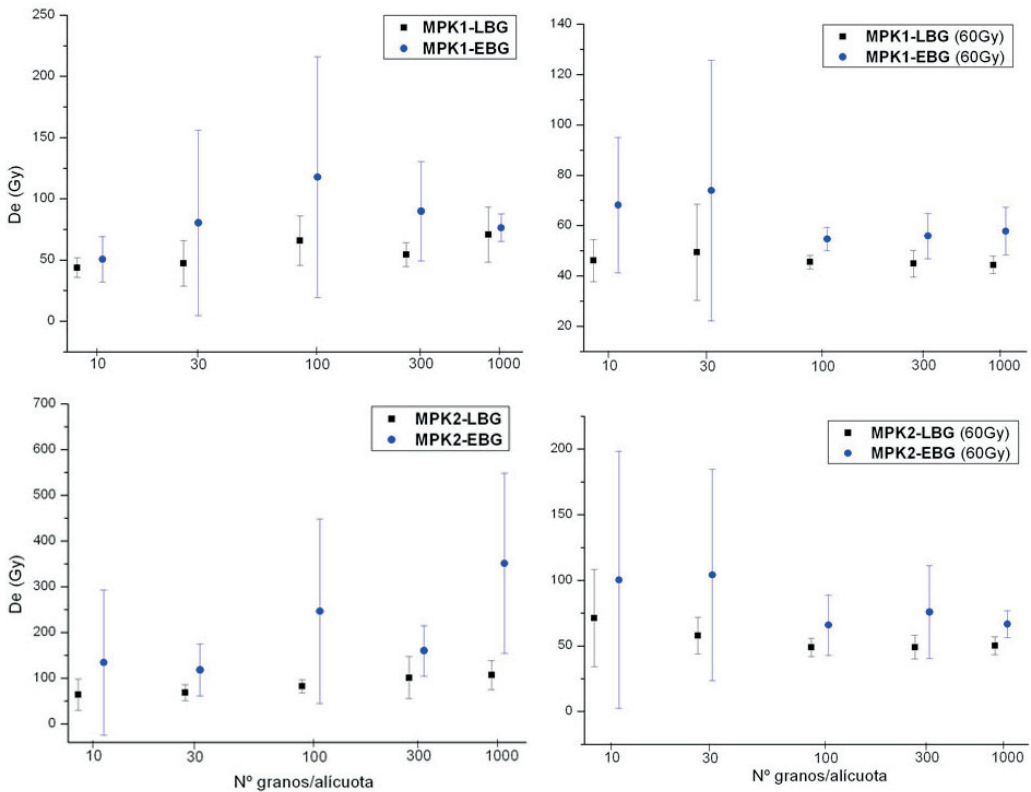
#### 8.1.2.8. Tamaño de alícuota y variabilidad de las estimaciones.

En las siguientes figuras (Fig. 8.7.1, 8.7.2, 8.7.3, 8.7.4, 8.7.5 y 8.7.6) se representan las estimaciones de la *De* promedio en función del tamaño de alícuota, esto es, a partir de alícuotas con 10, 30, 100, 300 y 700 granos de cuarzo (arpo.) para MPK, y de 10, 30, 100 y 300 granos de cuarzo (arpo.) para ABC, de las cuales se extrae la señal natural OSL correspondiente, así como una señal OSL regenerada obtenida al inducir, a las mismas alícuotas, una dosis baja y lejos del umbral de saturación de 60Gy. Estas estimaciones resultan de los promedios obtenidos al interpolar estas señales OSL normalizadas en las curvas de crecimiento estándar generadas a partir de los datos obtenidos para cada muestra mediante el protocolo SAR.

En general, para las muestras MPK, el promedio estimado para cada uno de los tamaños de alícuota analizados, tanto para las señales OSL natural como regenerada obtenidas mediante el método LBG y EBG, no varía de manera relevante, presentando una respuesta muy homogénea. De igual manera ocurre con la desviación típica, en donde, a pesar de observarse algunas diferencias entre los métodos de integración para

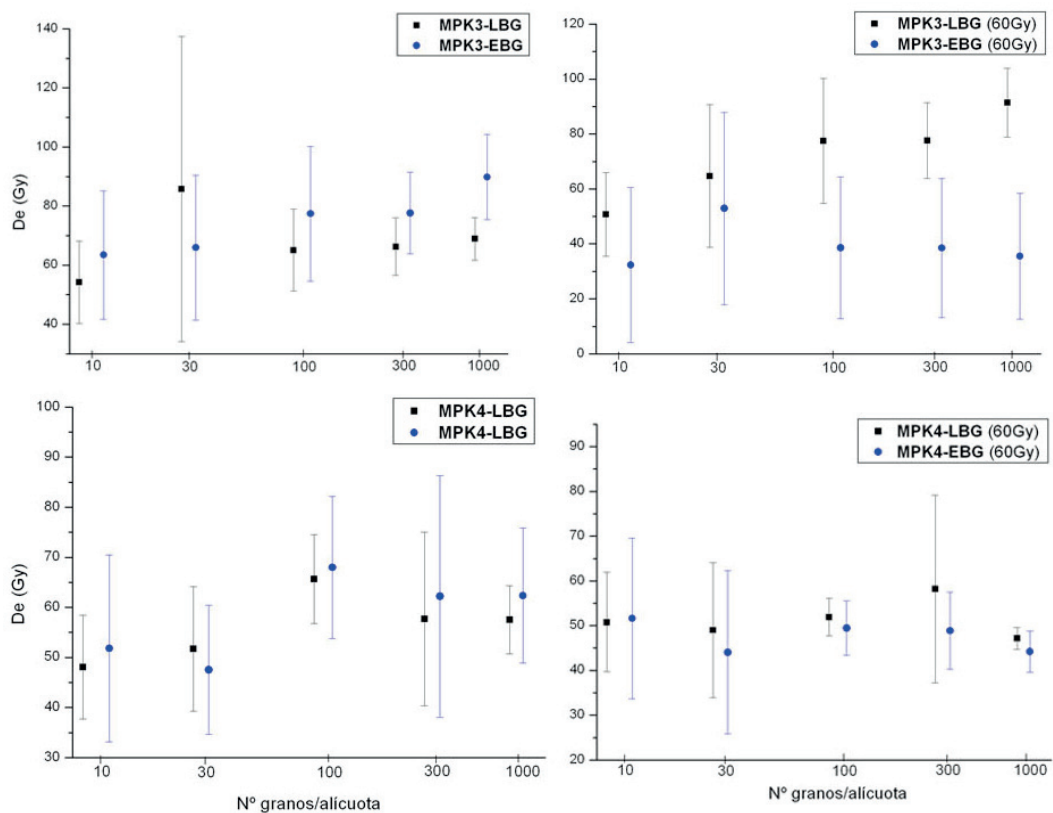
algunas de las muestras (por ejemplo, MPK1 o MPK5), no se aprecia una tendencia clara en función del tamaño de alícuota (Fig. 8.7.2 y 8.7.3).

La única excepción en donde se observa un claro incremento en la estimación de la *De* al aumentar el tamaño de alícuota viene representada por la muestra MPK3, para la señal regenerada (60Gy) extraída mediante el método LBG, con un incremento que se produce, principalmente, al pasar de 10 granos por alícuota a aproximadamente 100 granos, si bien, las barras de error, que representan la desviación típica de las estimaciones para cada uno de los tamaños analizados se solapan (Fig. 8.7.2).

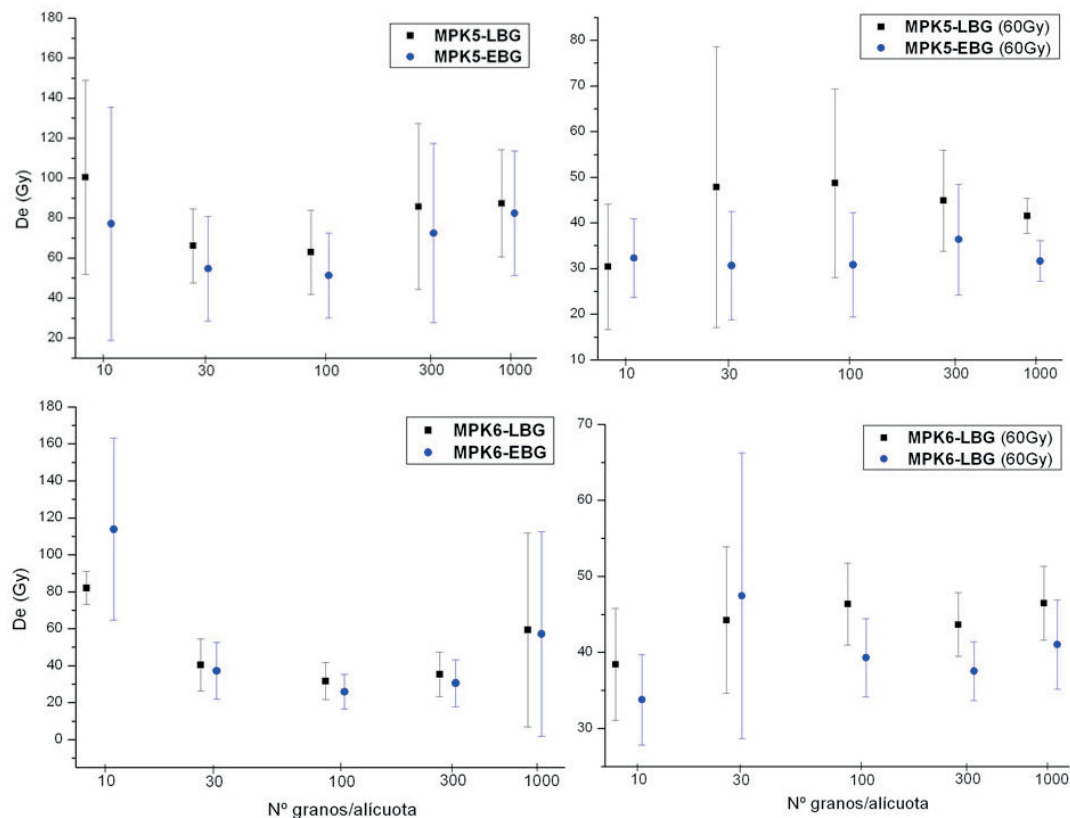


**Figura 8.7.1.** Dosis equivalente (*De*) promedio y desviación típica (barras de error) en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100, 300 y 700 granos de cuarzo) a partir de la señal OSL natural (izquierda) y de la señal regenerada (*D*=60Gy) (derecha). En cada gráfico se representa la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuadrado negro) y la señal OSL obtenida mediante el método EBG (círculo azul), para las muestras MPK1 yMPK2.

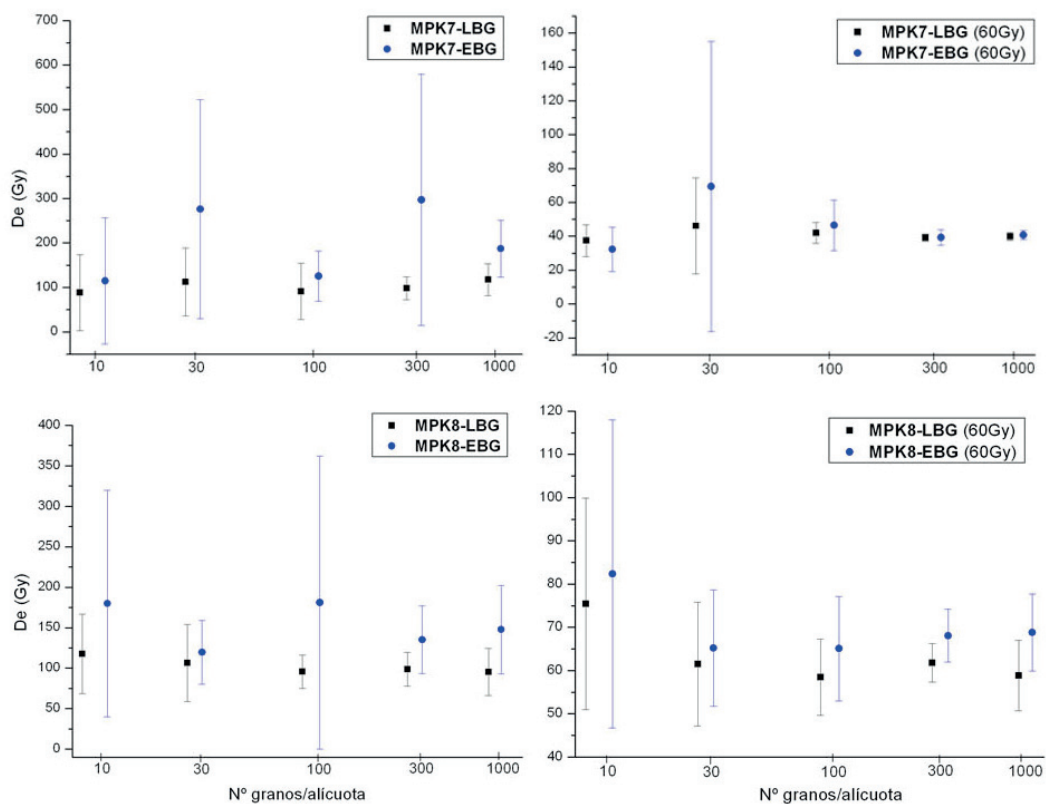




**Figura 8.7.2.** Dosis equivalente ( $D_e$ ) promedio y desviación típica (barras de error) en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100, 300 y 700 granos de cuarzo) a partir de la señal OSL natural (izquierda) y de la señal regenerada ( $D=60\text{Gy}$ ) (derecha). En cada gráfico se representa la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuadrado negro) y la señal OSL obtenida mediante el método EBG (círculo azul), para las muestras MPK3 y MPK4.



**Figura 8.7.3.** Dosis equivalente ( $D_e$ ) promedio y desviación típica (barras de error) en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100, 300 y 700 granos de cuarzo) a partir de la señal OSL natural (izquierda) y de la señal regenerada ( $D=60\text{Gy}$ ) (derecha). En cada gráfico se representa la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuadrado negro) y la señal OSL obtenida mediante el método EBG (círculo azul), para las muestras MPK5 y MPK6.



**Figura 8.7.4.** Dosis equivalente (De) promedio y desviación típica (barras de error) en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100, 300 y 700 granos de cuarzo) a partir de la señal OSL natural (izquierda) y de la señal regenerada ( $D=60\text{Gy}$ ) (derecha). En cada gráfico se representa la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuadrado negro) y la señal OSL obtenida mediante el método EBG (círculo azul), para las muestras MPK7 y MPK8.

Al describir en detalle estos gráficos de dispersión, y tomando las muestras MPK1 y MPK8 como representativas del conjunto de muestras MPK –de litología esquistosa y granítica respectivamente- se puede observar como, por ejemplo, para la primera muestra (MPK1), tanto para la señal OSL natural (0Gy) como para la regenerada (60Gy), se observa un rango en la estimación de la dosis entre 24Gy y 96Gy para LBG y entre 24Gy y 216Gy para EBG. Así, las diferencias en los promedios estimados mediante EBG vienen acompañadas por un incremento en la dispersión, si se compara con el método LBG. Por otra parte, si se compara la dispersión que presentan los diferentes tamaños de alícuota de la señal OSL natural, esta disminuye para el tamaño correspondiente a 10 granos y para el tamaño de 700 granos, si bien, esta reducción de la dispersión

viene acompañada por un elevado porcentaje de alícuotas por encima del umbral de saturación (un 35%; datos no representados) contando así con un menor número de alícuotas aceptadas (Tabla 12). Respecto a la señal regenerada, e independientemente del método de integración, las estimaciones son muy homogéneas y la dispersión tiende a reducirse al aumentar en tamaño de alícuota. Por otra parte, para la muestra MPK8, las estimaciones promedio son muy homogéneas, tanto para la señal OSL natural como para la regenerada, con rangos entre 90 y 120Gy mediante el LBG y entre 120 y 180Gy para el EBG.

Por tanto, para las muestras MPK no se observa un incremento significativo de la *De* acompañado de un descenso en la dispersión al aumentar el tamaño de alícuota, como suele suceder cuando está presente una mezcla de granos con y sin señal residual (*burial signal*) debido, por ejemplo, al fenómeno de blanqueamiento incompleto de la señal OSL. Únicamente, para el método EBG, se observa una mayor variabilidad en las estimaciones y un mayor rango de dispersión, como puede ocurrir con algunas muestras como MPK1, MPK2, MPK7 y MPK8 (Tablas 12 y 13).

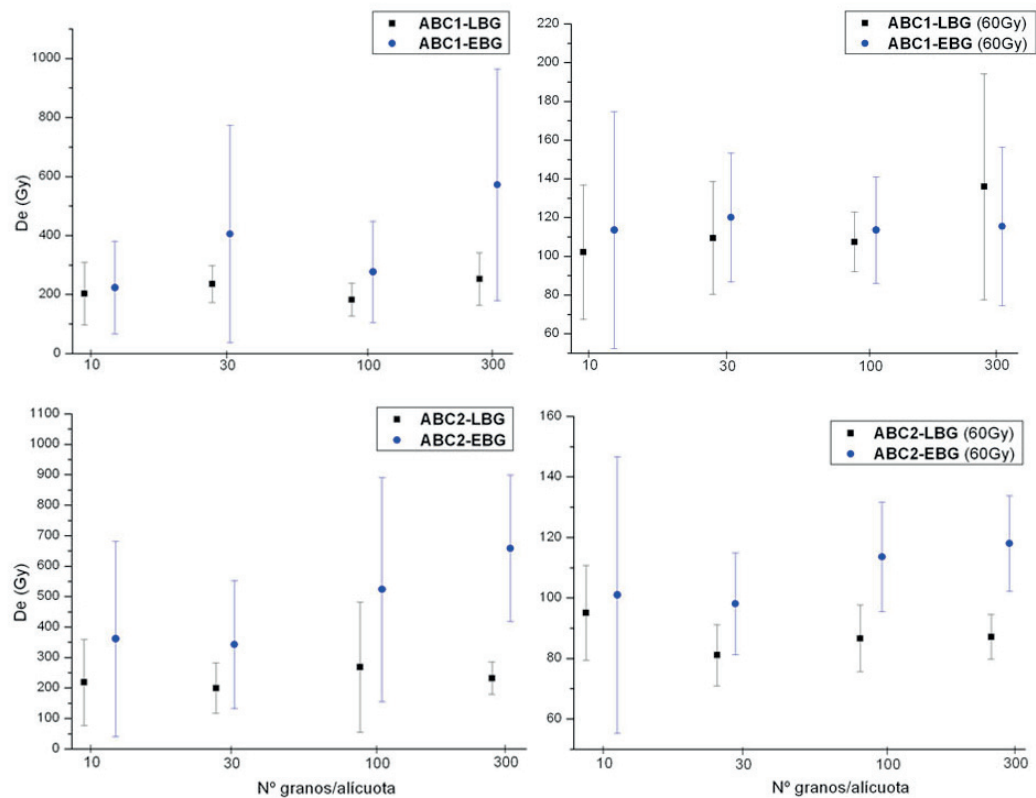
**Tabla 12.** Estimación de la *De* promedio (Gy) y desviación típica de la señal OSL natural (Dosis=0Gy) para los distintos tamaños de alícuota (10, 30, 100, 300 y >700 granos de cuarzo) y número de alícuotas (N)

Muestra	10	N	30	N	100	N	300	N	>700	N
MPK1- LBG	44 ± 8	8	47 ± 19	8	66 ± 20	8	54 ± 10	8	71 ± 23	8
MPK1- EBG	51 ± 19	10	80 ± 76	9	118 ± 98	8	90 ± 41	8	76 ± 11	4
MPK2- LBG	64 ± 34	10	68 ± 18	9	82 ± 15	8	101 ± 46	8	107 ± 32	8
MPK2- EBG	134 ± 159	8	118 ± 57	9	247 ± 202	8	160 ± 55	5	313 ± 191	5
MPK3- LBG	54 ± 14	9	86 ± 52	8	65 ± 14	8	66 ± 10	9	69 ± 7	9
MPK3- EBG	63 ± 22	7	66 ± 24	4	77 ± 23	7	78 ± 14	8	91 ± 13	8
MPK4- LBG	48 ± 10	10	52 ± 12	9	66 ± 9	8	58 ± 17	8	58 ± 7	8
MPK4- EBG	52 ± 19	10	48 ± 13	9	68 ± 14	8	62 ± 24	8	62 ± 10	8
MPK5- LBG	100 ± 49	3	66 ± 18	11	63 ± 21	7	86 ± 41	10	87 ± 27	11
MPK5- EBG	77 ± 58	2	55 ± 27	11	51 ± 21	7	72 ± 45	9	82 ± 31	8
MPK6- LBG	82 ± 9	2	40 ± 14	8	32 ± 10	7	35 ± 12	8	59 ± 53	8
MPK6- EBG	114 ± 49	2	37 ± 15	8	25 ± 9	8	31 ± 13	8	57 ± 55	8
MPK7- LBG	88 ± 85	7	116 ± 77	9	91 ± 63	8	98 ± 25	8	118 ± 36	8
MPK7- EBG	115 ± 142	6	276 ± 246	6	125 ± 56	6	297 ± 283	5	187 ± 64	3
MPK8- LBG	118 ± 49	18	107 ± 47	19	96 ± 21	8	99 ± 21	8	96 ± 29	8
MPK8- EBG	180 ± 140	20	120 ± 39	18	181 ± 181	8	135 ± 42	8	148 ± 55	8

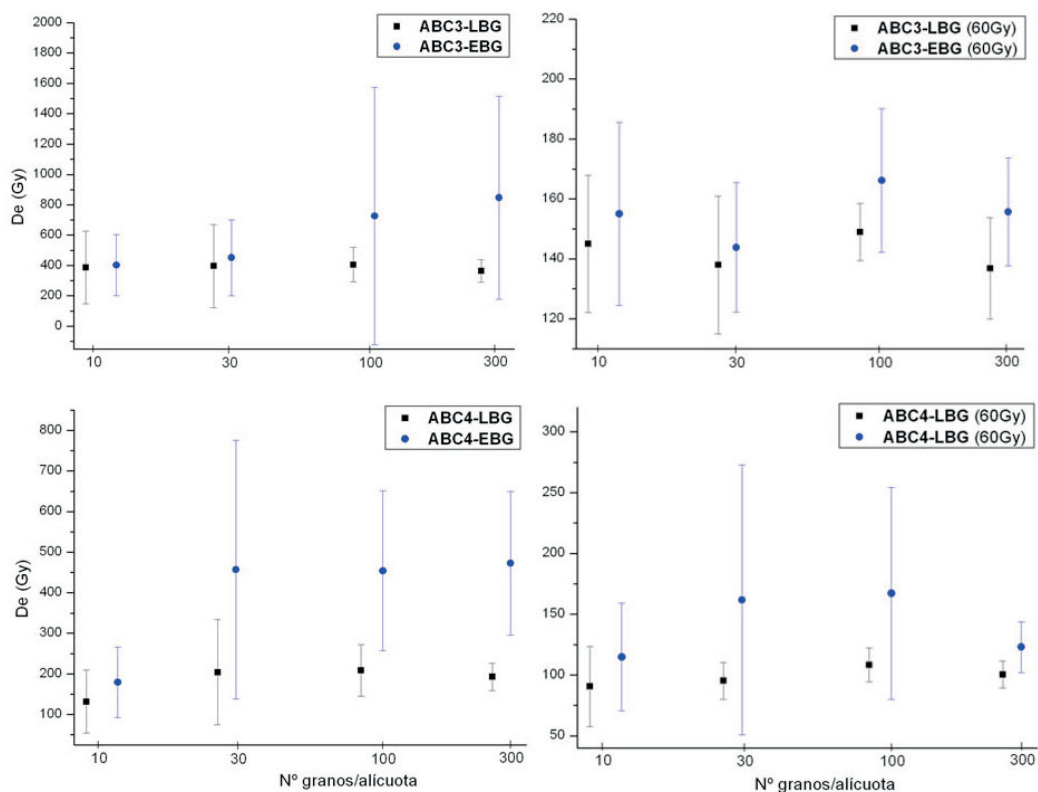
**Tabla 13.** Estimación de la De promedio (Gy) y desviación típica de la señal OSL regenerada (Dosis=60Gy) para los distintos tamaños de alícuota (10, 30, 100, 300 y >700 granos de cuarzo) y número de alícuotas (N)

Muestra (D=60Gy)	10	N	30	N	100	N	300	N	>700	N
MPK1- LBG (60Gy)	46 ± 8	8	49 ± 19	8	46 ± 3	8	45 ± 5	8	44 ± 3	8
MPK1- EBG (")	68 ± 27	8	74 ± 52	7	55 ± 5	8	56 ± 9	8	58 ± 9	8
MPK2- LBG (60Gy)	71 ± 37	9	58 ± 14	9	49 ± 7	8	49 ± 9	8	50 ± 7	8
MPK2- EBG (")	100 ± 98	12	104 ± 81	9	66 ± 23	8	76 ± 35	8	67 ± 10	8
MPK3- LBG (60Gy)	47 ± 13	8	46 ± 8	9	48 ± 5	8	46 ± 3	8	44 ± 2	8
MPK3- EBG (")	51 ± 15	7	65 ± 26	4	65 ± 9	7	53 ± 7	8	49 ± 2	8
MPK4- LBG (60Gy)	51 ± 11	10	49 ± 15	9	52 ± 4	8	58 ± 21	8	47 ± 2	8
MPK4- EBG (")	52 ± 18	10	44 ± 18	9	49 ± 6	8	49 ± 9	7	44 ± 5	8
MPK5- LBG (60Gy)	30 ± 14	3	48 ± 31	14	49 ± 21	7	45 ± 11	12	42 ± 2	12
MPK5- EBG (")	32 ± 9	2	31 ± 12	13	31 ± 11	14	36 ± 12	12	32 ± 4	12
MPK6- LBG (60Gy)	38 ± 7	2	44 ± 10	8	46 ± 5	7	44 ± 4	8	46 ± 5	8
MPK6- EBG (")	34 ± 6	2	47 ± 19	5	39 ± 5	8	38 ± 4	8	41 ± 6	8
MPK7- LBG (60Gy)	37 ± 9	7	46 ± 28	9	42 ± 6	8	39 ± 2	8	40 ± 2	8
MPK7- EBG (")	32 ± 13	7	69 ± 86	8	47 ± 15	8	39 ± 5	8	41 ± 3	8
MPK8- LBG (60Gy)	75 ± 24	26	62 ± 14	19	58 ± 9	8	62 ± 4	8	59 ± 8	8
MPK8- EBG (")	82 ± 36	24	65 ± 14	19	65 ± 12	8	68 ± 6	8	69 ± 9	8

Respecto a las muestras ABC, los gráficos de dispersión para cada uno de los tamaños de alícuota analizados, se representan en las figura siguientes (Fig. 8.7.5 y 8.7.6), en las cuales se observa, al igual que en MPK, una amplia dispersión para EBG, pero donde no se evidencia de forma tan clara estimaciones homogéneas para cada uno de los tamaños analizados, principalmente en ABC4 y ABC1.



**Figura 8.7.5.** Dosis equivalente ( $D_e$ ) promedio y desviación típica (barras de error) en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100 y 300 granos de cuarzo) a partir de la señal OSL natural (izquierda) y de la señal regenerada ( $D=60\text{Gy}$ ) (derecha). En cada gráfico se representa la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuadrado negro) y la señal OSL obtenida mediante el método EBG (círculo azul), para las muestras ABC1 y ABC2.



**Figura 8.7.6.** Dosis equivalente (De) promedio y desviación típica (barras de error) en función del tamaño de alícuota (10, 30, 100 y 300 granos de cuarzo) a partir de la señal OSL natural (izquierda) y de la señal regenerada ( $D=60\text{Gy}$ ) (derecha). En cada gráfico se representa la señal OSL extraída mediante el método de integración LBG (cuadrado negro) y la señal OSL obtenida mediante el método EBG (círculo azul), para las muestras ABC3 y ABC4.

De manera detallada, el promedio estimado para ABC1 mediante el método de integración LBG para la señal natural OSL varía entre 180Gy y 250Gy, mientras que, al emplear el método EBG, este rango asciende hasta los 572Gy, si bien, la dispersión también aumenta de manera considerable a medida que se incrementa el tamaño de la alícuota. Por otra lado, los valores de dosis promedio así como la dispersión presentan valores muy homogéneos, con estimaciones entre 110Gy y 120Gy para la señal regenerada ( $D=60\text{Gy}$ ) (Tablas 14 y 15).

Para la muestra ABC4, la dosis promedio de la señal OSL natural empleando el método de integración LBG, presenta valores muy homogéneos, entre 130Gy y 200Gy, si bien, mediante el método EBG los valores se incrementan con los tamaños de 30, 100 y 300 granos, entre 450Gy y 475Gy y presentando una amplia



dispersión, mientras que el tamaño de 10 granos presenta una estimación de  $179 \pm 80 \text{ Gy}$  (Tablas 14 y 15). Respecto a la señal regenerada ( $60 \text{ Gy}$ ), el rango estimado de dosis mediante el método LBG varía desde 90 a  $110 \text{ Gy}$  aproximadamente y con una dispersión que tiende a disminuir al incrementarse el tamaño de alícuota. Mediante el método EBG el rango estimado de dosis varía desde  $115 \text{ Gy}$  a  $165 \text{ Gy}$  con una amplia dispersión, sobre todo para los tamaños de 30 y 100 granos, que se reduce más de un 50% para los tamaños extremos, de 10 y 300 granos.

Así, para las muestras ABC, cuando se emplea el método LBG, no se observa un incremento de la  $D_e$  estimada, tanto la señal natural OSL como la regenerada ( $60 \text{ Gy}$ ), aunque sí un descenso de la dispersión. No obstante, al emplear el método EBG sí se observa este incremento en las estimaciones, a veces por encima del 50%, aunque raramente acompañado de una reducción de la dispersión, razón por la cual se ha optado por la realización de un SAR con un tamaño de alícuota de 10 granos para las muestras ABC1 y ABC4 con el fin de reducir la incertidumbre, y que se suma a los SAR realizados con un tamaño de alícuota de 100 granos para todas y cada una de las muestras MPK y ABC.

**Tabla 14.** Estimación de la  $D_e$  promedio (Gy) y desviación típica de la señal OSL natural ( $D_{\text{osis}}=0 \text{ Gy}$ ) para los distintos tamaños de alícuota (10, 30, 100 y  $>300$  granos de cuarzo) y número de alícuotas (N)

Muestra	10	N	30	N	100 G	N	>300	N
ABC1- LBG	$203 \pm 105$	10	$236 \pm 62$	10	$183 \pm 55$	10	$252 \pm 89$	10
ABC1- EBG	$223 \pm 157$	10	$406 \pm 368$	7	$277 \pm 171$	7	$572 \pm 392$	7
ABC2- LBG	$218 \pm 141$	10	$200 \pm 83$	10	$268 \pm 214$	10	$232 \pm 53$	10
ABC2- EBG	$361 \pm 321$	10	$343 \pm 210$	10	$524 \pm 368$	8	$658 \pm 240$	8
ABC3- LBG	$387 \pm 240$	10	$397 \pm 274$	7	$406 \pm 114$	10	$364 \pm 75$	9
ABC3- EBG	$402 \pm 201$	10	$452 \pm 249$	9	$726 \pm 849$	10	$847 \pm 669$	10
ABC4- LBG	$132 \pm 78$	10	$204 \pm 130$	10	$209 \pm 64$	10	$193 \pm 34$	10
ABC4- EBG	$179 \pm 87$	10	$457 \pm 319$	9	$454 \pm 197$	8	$473 \pm 177$	8

**Tabla 15.** Estimación de la  $D_e$  promedio (Gy) y desviación típica de la señal OSL regenerada (Dosis=60Gy) para los distintos tamaños de alícuota (10, 30, 100 y >300 granos de cuarzo) y número de alícuotas (N)

Muestra	10	N	30	N	100 G	N	>300	N
ABC1- LBG (60Gy)	111 ± 17	10	117 ± 13	10	108 ± 16	10	120 ± 22	10
ABC1- EBG (")	114 ± 61	10	120 ± 33	9	114 ± 28	10	115 ± 41	10
ABC2- LBG (60Gy)	95 ± 16	10	81 ± 10	10	87 ± 11	10	87 ± 7	10
ABC2- EBG (")	115 ± 22	10	98 ± 17	10	114 ± 18	10	118 ± 16	10
ABC3- LBG (60Gy)	145 ± 23	9	138 ± 23	10	149 ± 9	10	137 ± 17	10
ABC3- EBG (")	155 ± 31	8	144 ± 22	9	166 ± 24	10	156 ± 18	10
ABC4- LBG (60Gy)	91 ± 31	10	95 ± 15	10	108 ± 14	10	100 ± 11	10
ABC4- EBG (")	115 ± 44	10	162 ± 111	10	167 ± 87	10	123 ± 21	10

### 8.1.3. Sobre-dispersión (OD): valores y correlación con la tasa DR.

En la tabla (Tabla 16) se describen los valores de sobre-dispersión (OD) estimada mediante el modelo CAM para las muestras MPK, incluyendo todas las alícuotas aceptadas y excluyendo aquellas que interpolan en la parte lineal cercana a la zona de saturación dentro de la curva de crecimiento OSL. En el primer caso, al incluir todas las alícuotas y empleando el método de integración LBG, se obtienen porcentajes que, generalmente, están por encima del 40% (llegando incluso hasta un 70% , para la muestra MPK6), a excepción de MPK7 y MPK8 que presenta valores inferiores al 30%. Si por el contrario, se emplea el método EBG, estos porcentajes están, generalmente, en torno al 30%, a excepción de MPK2 y MPK6, con más de un 50% y 70% respectivamente. También, empleando el método EBG, la muestra MPK8 mantiene sus valores respecto al método LBG, y la muestra MPK reduce el porcentaje de ODEBG por debajo del 20%. Por otra parte, cuando se excluyen aquellas alícuotas que interpolan en la parte lineal de saturación y cuya estimación de la dosis es igual o superior a 200Gy, el porcentaje de sobre-dispersión generalmente se reduce, tanto para LBG como para EBG (a excepción de MPK2, mediante el método LBG). Un claro ejemplo esta reducción en los porcentajes lo ofrece la muestra MPK7 la cual se observan valores de  $OD_{EBG}$  del  $13 \pm 5\%$ .

Para las muestras ABC, el porcentaje de OD estimado a partir de un tamaño de alícuota de 100 granos por alícuotas e independientemente del método de integración empleado (LBG o EBG), se obtienen porcentajes próximos o superiores al 40% (ABC4 alcanza el 60%) como también se describe en la misma tabla (Tabla 16), a excepción de ABC2, con valores próximos al 30%. Además, cuando se emplea un tamaño de alícuota de 10 granos para las muestras ABC1 y ABC4 y se excluyen aquellas alícuotas cuya  $D_e$  estimada interpola en la zona

lineal de saturación de la curva OSL ( $\geq 200\text{Gy}$ ), el porcentaje de  $OD$  se reduce, desde valores próximos al 40% hacia valores ya más cercanos al 25% para ABC1, y hacia el 30% para ABC4, tanto para LBG como para EBG. Es importante recordar que la  $OD$  estimada en el test *Dose-recovery* para todas las muestras MPK y ABC, de las que se ha extraído la señal OSL, suele ser inferior o rondar el 10%.

**Tabla 16.** Porcentaje de sobre-dispersión (OD) con su error asociado, para los métodos de integración LBG y EBG, con un tamaño de alícuota de 100granos. Se han realizado dos estimaciones distintas: (A) incluyendo todas las alícuotas aceptadas y (B) excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  estimada es igual o superior a los 200Gy. (N) es el número de alícuotas incluidas en la estimación del total analizadas. El asterisco (\*) indica el análisis realizado para las muestras ABC1 y ABC4 con un tamaño de alícuota de 10 granos.

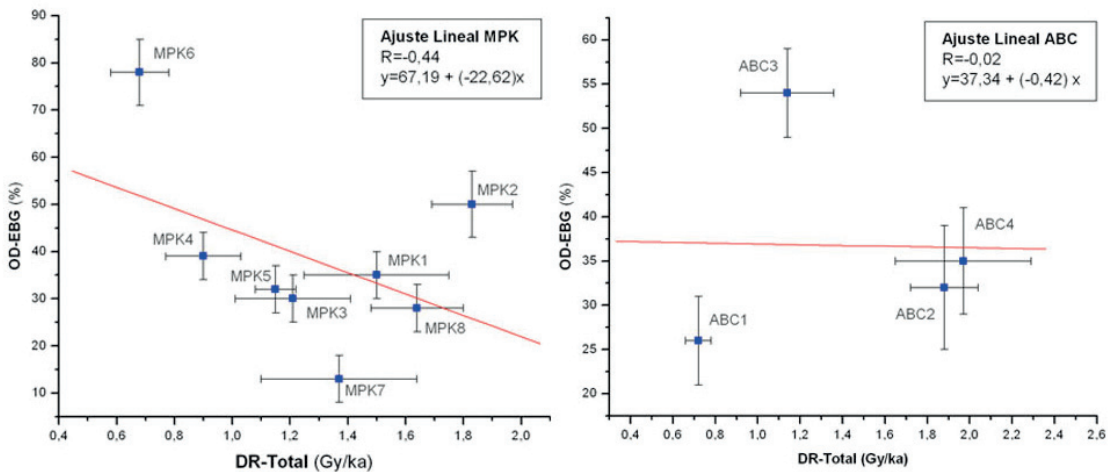
LBG	(A)		(B)		EBG	(A)		(B)	
	Todas las alícuotas		Alícuotas (<200Gy)			Todas las alícuotas		Alícuotas (<200Gy)	
Muestra	OD - LBG	N	OD - LBG	N	Muestra	OD - EBG	N	OD - EBG	N
MPK-1	52±5	71/141	51±5	69/141	MPK-1*	36±5	61/141	35±5	59/141
MPK-2	49±4	103/202	48±4	92/202	MPK-2*	52±7	37/202	50±7	36/202
MPK-3	52±6	54/168	49±5	50/168	MPK-3	30±5	44/168	30±5	43/168
MPK-4	40±5	49/91	--	--	MPK-4	39±5	51/91	--	--
MPK-5	43±5	65/125	--	--	MPK-5*	33±5	52/125	32±5	51/125
MPK-6	70±5	116/188	--	--	MPK-6	78±7	65/188	--	--
MPK-7	26±2	116/219	30±4	108/219	MPK-7*	19±5	31/219	13±5	27/219
MPK-8	28±4	41/195	26±4	32/195	MPK-8*	29±4	30/195	28±5	26/195
ABC-1	47±4	63/118	37±4	27/118	ABC-1	41±5	38/118	41±7	23/118
ABC-2	32±3	52/100	27±4	25/100	ABC-2	41±5	40/100	32±5	17/100
ABC-3	38±4	47/83			ABC-3	36±4	38/83		
ABC-4	61±6	54/86	53±6	45/86	ABC-4	69±8	38/86	54±8%	27/86
ABC-1*	38±8	55/133	27±4	34/133	ABC-1*	38±7	37/133	26±5	29/133
ABC-4*	40±5	37/112	34±5	33/112	ABC-4*	41±6	30/112	35±6	27/112

8.1.3.1. Sobre-dispersión, tasa de radiación total y su componente beta.

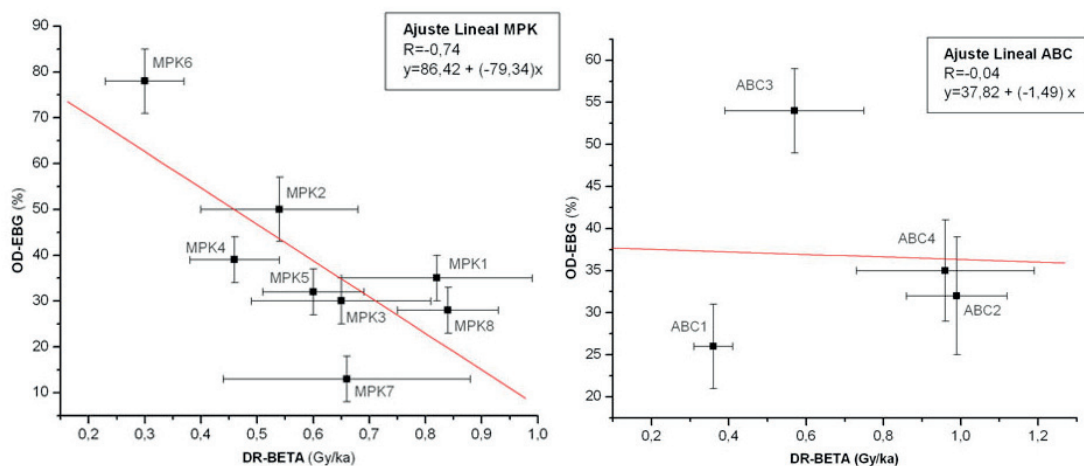
Para una mejor comprensión del comportamiento de las muestras que presentan una  $OD_{\text{EBG}}$  muy elevada y su relación con la dosimetría ( $DR_{\text{TOTAL}}$ ) y microdosimetría ( $DR_{\text{BETA}}$  y proporción de potasio) se ha optado por comparar los resultados obtenidos incluyendo todas las muestras MPK con aquellos obtenidos cuando se excluyen las muestras MPK7 y MPK8. El motivo de excluir la muestra MPK7 se debe a que no presenta un comportamiento anómalo, con unos porcentajes de  $OD_{\text{EBG}}$  por debajo del 15%, y por tanto dentro de los

valores de referencia para los depósitos fluviales (ver apartado 9 -tercer párrafo). Por su parte, el motivo de exclusión de la muestra MPK8 se debe a que pertenece a un depósito desarrollado a partir de granitos a diferencia del resto de muestras MPK, desarrolladas a partir de esquistos, con las diferencias que ello supone a efectos dosimétricos (ver apartados 4.1. y 9.1.1.). Respecto a las muestras ABC, se incluirán los resultados obtenidos para un tamaño de alícuota de 10 granos para ABC1 y ABC4 y para un tamaño de alícuota de 100 granos, aproximadamente, para ABC2 y ABC3.

En base a los resultados obtenidos en el ajuste de tipo lineal realizado entre los valores de radiación natural ( $DR_{TOTAL}$ ) y la sobre-dispersión ( $OD_{EBG}$ ) (asumiendo el método EBG como el más adecuado para una señal OSL con una elevada contribución de las componentes media y lenta) no se puede establecer, con un coeficiente R próximo a -0.4 (Fig. 8.8.1), una correlación de este tipo para las muestras MPK, tanto si se incluyen todas las muestras como si no. No obstante, sí se observa una tendencia a partir de la cual, a mediada que la  $DR_{TOTAL}$  aumenta, disminuye la  $OD_{EBG}$ . Además, los valores que ofrece el ajuste exponencial y logarítmico, no representados en la figura, son muy similares. En lo que concierne a las muestras ABC y como se puede observar en la misma figura, no se puede asumir, con un escaso número de datos y un coeficiente R de -0.02, una correlación de tipo lineal entre ambas variables, y la línea de tendencia no muestra variaciones considerables para la  $OD_{EBG}$  a medida que se incrementa la  $DR_{TOTAL}$ .



**Figura 8.8.1.** Porcentaje de sobre-dispersión estimada mediante el método EBG ( $OD_{EBG}$ ) frente a la tasa de radiación natural ( $DR_{TOTAL}$ ), incluyendo la recta de regresión lineal y su ecuación, así como el coeficiente de correlación (R) para las muestras MPK (izquierda) y para las muestras ABC (dcha). (La  $OD_{EBG}$  de las muestras ABC1 y ABC4 se ha estimado a partir del tamaño de alícuota de 10 granos).



**Figura 8.8.2.** Porcentaje de sobre-dispersión estimada mediante el método EBG (OD-EBG) frente a la componente beta de la tasa de radiación natural (DR-BETA), incluyendo la recta de regresión lineal y su ecuación, así como el coeficiente de correlación (R) para las muestras MPK (izquierda) y para las muestras ABC (dcha). (La OD-EBG de las muestras ABC1 y ABC4 se ha estimado a partir del tamaño de alícuota de 10 granos).

No obstante, a efectos de heterogeneidad en la microdosimetría del sedimento y dentro de la propia muestra, aporta mayor información conocer la relación entre la componente beta ( $DR_{BETA}$ ) (de menor poder de penetración que la componente gamma (ver apartados 4.2. y 4.2.1.3.1.)) y la  $OD_{EBG}$ . Así, en la figura (Fig. 8.8.2) se puede observar, para las muestras MPK, una tendencia muy marcada entre ambas variables. Así, cuando se incluyen todas las muestras se obtiene con un coeficiente R de -0.74 y cuando se excluyen las muestras MPK7 y MPK8, este coeficiente R es de -0.8. En ambos casos, la dependencia entre ambas variables parece clara. Respecto a las muestras ABC, y como se puede observar en la misma figura, los resultados no varían con respecto a la  $DR_{TOTAL}$ .

#### 8.1.4. Estimación de la proporción de potasio mediante FRX para las muestras MPK.

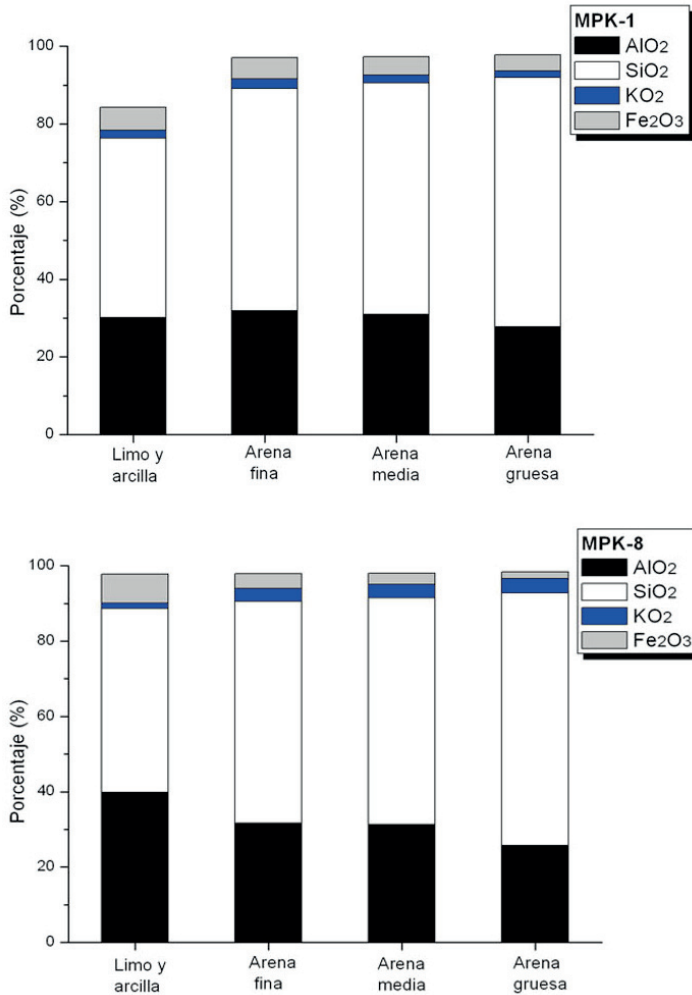
Para conocer la proporción aproximada de los elementos más representativos y abundantes que componen las muestras MPK, así como de la proporción de potasio –y, por extensión, de potasio 40, radiactivo– se ha realizado un análisis mediante la técnica de fluorescencia de rayos-X (FRX) de las distintas fracciones granulométricas extraídas mediante tamizado. Este tipo de análisis permite evaluar de manera aproximada, posibles variaciones y heterogeneidad en la micro-dosimetría beta que pudiera contribuir o relacionarse con los porcentajes de OD estimados para cada muestra.

En general, los elementos más abundantes observados en cualquiera de las fracciones es, en primer lugar, el sílice, con porcentajes que están próximos al 50% o por encima, seguido del aluminio con valores entre el 20 y

30% (excepto en MPK7 cuya fracción arenosa presenta porcentajes de Si del 90% y del 5% de Al) (Tabla 17). En menor medida está presente el hierro con porcentajes que, generalmente están entre el 1 y el 5%, y por último el potasio, cuyos valores rara vez superan el 2%, si bien, para MPK8 se alcanza un máximo de 3.76% en la fracción más gruesa analizada, y para MPK1, los valores para cada una de las fracciones rondan el 2% (Fig. 8.8.3).

**Tabla 17.** Porcentaje de aluminio, sílice, potasio y hierro en las muestras del río Mero (MPK) para cada una de las fracciones granulométricas correspondientes a los tamaños de gano de limo-arcilla (<63µm), arena fina (63-125µm), arena media (125-500µm), arena gruesa (500-1000µm).

Muestra	MPK1 (Bribes)				MPK2 (Sta.Cruz)			
fracción (µm)	<63	63-125	125-500	500-1000	<63	63-125	125-500	500-1000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,085	31,86	30,97	27,7	28,28	27,93	26,53	25,97
SiO <sub>2</sub>	46,245	57,27	59,51	64,22	49,34	66,12	68,26	68,96
K <sub>2</sub> O	2	2,43	2,02	1,67	1,13	0,809	0,682	0,696
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,952	5,514	4,833	4,197	4,37	2,759	2,425	2,343
Muestra	MPK3 (Dorneda)				MPK4 (Mera)			
fracción (µm)	<63	63-125	125-500	500-1000	<63	63-125	125-500	500-1000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,63	32,77	32,38	33,15	17,07	19,51	18,88	19,75
SiO <sub>2</sub>	61,105	62,07	62,84	61,93	70,90	75,52	76,68	75,84
K <sub>2</sub> O	0,789	0,727	0,672	0,696	0,65	0,576	0,552	0,612
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,08	2,03	1,964	2,079	1,62	1,341	1,21	1,163
Muestra	MPK5 (Mesón-Perillo)				MPK6 (Cecebre)			
fracción (µm)	<63	63-125	125-500	500-1000	<63	63-125	125-500	500-1000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,3	27,93	26,53	25,97	21,32	n.d.	n.d.	n.d.
SiO <sub>2</sub>	61,09	66,12	68,26	68,96	62,33	n.d.	n.d.	n.d.
K <sub>2</sub> O	0,759	0,809	0,682	0,696	1,35	n.d.	n.d.	n.d.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,551	2,759	2,425	2,343	3,66	n.d.	n.d.	n.d.
Muestra	MPK7 (Bastiagueiro)				MPK8 (Vilaboa)			
fracción (µm)	<63	63-125	125-500	500-1000	<63	63-125	125-500	500-1000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,07	4,63	6,08	6,47	39,86	31,59	31,23	25,74
SiO <sub>2</sub>	58,97	93,55	92,47	92,41	48,80	58,93	60,22	67,06
K <sub>2</sub> O	1,17	0,134	0,15	0,147	1,45	3,5	3,63	3,76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,415	0,6847	0,7834	0,601	7,67	3,826	2,948	1,79

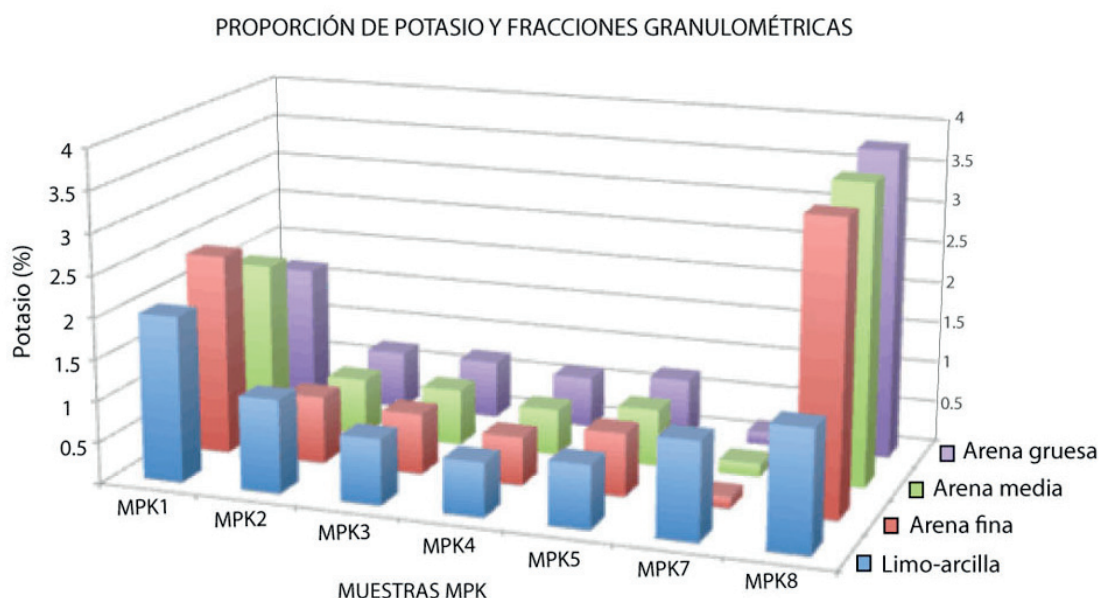


**Figura 8.8.3.** Proporción de Si, Al, Fe y K (en forma de óxido) obtenida mediante FRX para cada una de las fracciones granulométricas correspondientes a tamaños de partícula de limo-arcilla, arena fina, arena media y arena gruesa según la clasificación de Wentworth (1922). Arriba se representan los porcentajes para la muestras del río Mero MPK1 (Bribes) y debajo para la muestra MPK8 (Vilaboa).

A efectos de dosimetría, además de tener en cuenta la cantidad de potasio (K) presente (cuya proporción de isótopo radiactivo <sup>40</sup>K es de un 0.0117% del potasio total, según la IUPAC), resulta también de interés conocer la propia distribución de este elemento dentro de las muestras y la correlación que pudiera existir con los valores de la tasa de radiación y su componente beta, así como con la sobre-dispersión. Es por ello por lo que en la siguiente figura (Fig. 8.8.4) se representa la proporción de potasio para las muestras del río Mero (MPK) - a excepción de MPK6 (Cecebre) por falta de muestra- estimada en cada una de las fracciones granulométricas

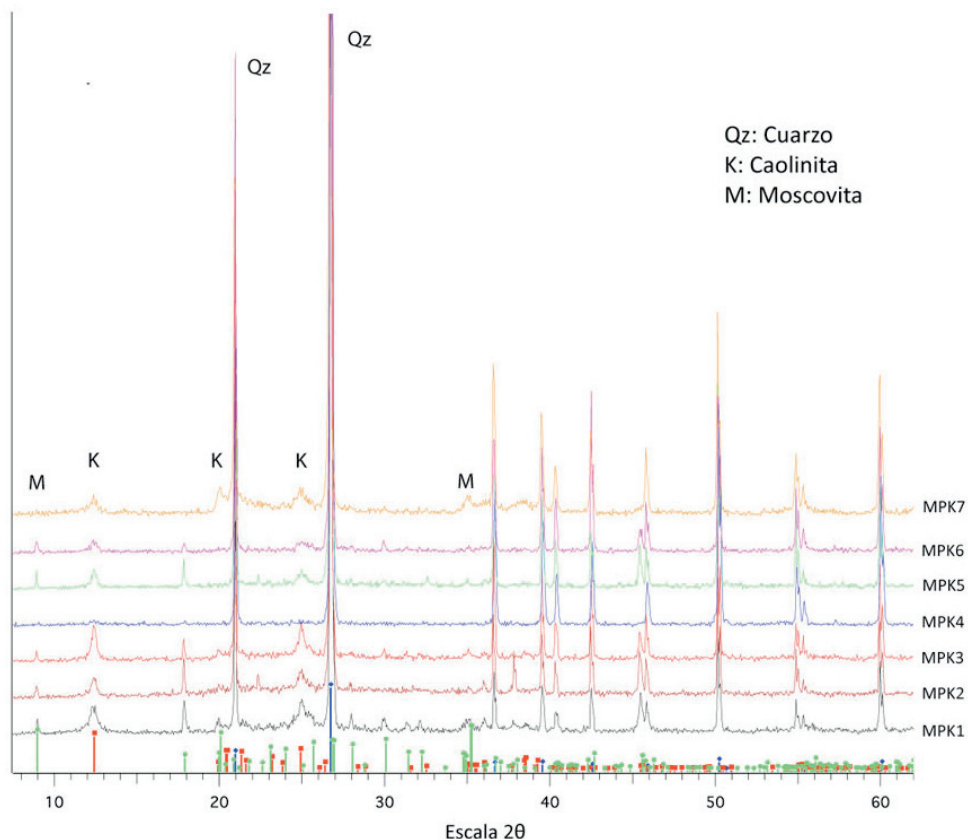


correspondientes a limo-arcilla, arena fina, arena media y arena gruesa. En un principio y como se puede observar en la misma figura, el potasio parece distribuirse de manera homogénea en cada una de las fracciones granulométricas a excepción de la muestra MPK7 (Bastigueiro) en la que este elemento se concentra en la fracción limosa con valores que no llegan al 1.2%, o la muestra MPK8 (Vilaboa) cuya concentración de potasio se reparte mayoritariamente entre las fracciones arenosas, con valores superiores al 3.5% - la fracción limo-arcillosa para esta última muestra presenta valores que no llegan al 1.5%. No obstante es indispensable normalizar la cantidad de K y su distribución a partir de las proporciones que presenten cada una de las fracciones granulométricas, como se explicará en el siguiente apartado.



**Figura 8.8.4.** Porcentaje de  $K_2O$  (eje Y) de las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo), MPK7 (Bastigueiro) y MPK8 (Vilaboa) ( en el eje X), para las fracciones granulométricas de limo-arcilla (azul), arena fina (rojo), arena media (verde) y arena gruesa (morado) (eje Z). limo-arcilla ( $<63\mu m$ ), arena muy fina ( $63-125\mu m$ ), arena fina-media ( $125-500\mu m$ ), arena gruesa ( $500-1000\mu m$ ).

Por último, se ha efectuado un análisis mediante difracción de rayos-X (DRX) para identificar los materiales cristalinos mayoritarios presentes en las muestras del río Mero (MPK). En el difractograma se puede observar como los materiales que conforman la muestra bruta son minerales de cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ], caolinita [ $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ] y moscovita [ $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ] (Fig.8.8.5). Además, la difracción de las fracciones arenosas detectan únicamente cuarzo y caolinita para la fracción fina ( $<63\mu\text{m}$ ) (estos datos no se han representado).



**Figura 8.8.5.** Difractogramas (DRX) obtenidos a partir de muestra bruta para MPK, exceptuando MPK8 (Vilaboa; muestra desarrollada sobre granito). En el eje X la escala 2-Theta ( $2\theta$ ) correspondiente al ángulo de giro de la muestra respecto al haz de rayos X, en este caso entre 2 y  $80^\circ$ , aunque solo se representa hasta  $60^\circ$ . También se ubican los picos más representativos de cuarzo (azul), caolinita (rojo) y moscovita (verde) encima del eje X, así como las zonas más representativas para estos minerales en el interior del gráfico.

### 8.1.5. Análisis granulométrico para las muestras MPK y ABC

En el siguiente apartado se muestran las proporciones de cada una de las fracciones granulométricas correspondientes a los tamaños de partícula de las arenas, limos y arcilla, para las muestras del río Mero (MPK) y las muestras del río Ulla (ABC), con el propósito de analizar cualquier tipo de relación indirecta, si hubiere, con parámetros como la tasa de radiación ionizante o la sobre-dispersión.

#### 8.1.5.1. Fracciones granulométricas para las muestras MPK.

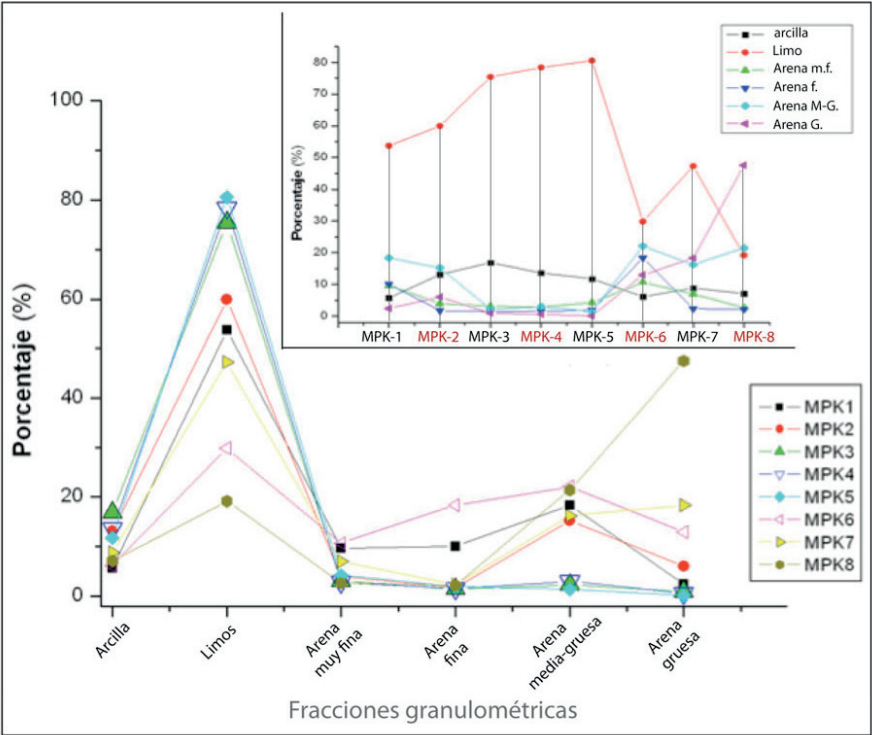
El porcentaje de cada una de las fracciones granulométricas correspondientes a tamaños de grano de arcilla ( $<2\mu\text{m}$ ), limo ( $2-63\mu\text{m}$ ), arena muy fina ( $63-125\mu\text{m}$ ), arena fina ( $125-250\mu\text{m}$ ), arena media-gruesa ( $250-1000\mu\text{m}$ ) y arena muy gruesa ( $>1000\mu\text{m}$ ) para las muestras MPK (río Mero), obtenidos mediante tamizado húmedo y técnicas de granulometría láser, se indica en la siguiente tabla (Tabla 18).

Si se describen los datos obtenidos para cada una de las fracciones comenzando, de menor a mayor, por el tamaño de partícula correspondiente a la arcilla, los porcentajes varían dentro de un rango entre un 5.7% y un 16%. No obstante, la fracción fina más abundante corresponde al tamaño limos, con unos porcentajes muy variables entre el rango del 19% y un 80%. Cabe destacar que la muestra de MPK8 (Vilaboa), desarrollada sobre granito, presenta un menor porcentaje de finos (arcilla y limos) frente a tamaños de grano superiores (fracción arenosa). Para el resto de muestras, desarrolladas a partir de esquisto, la proporción de limos también es variable, con muestras como MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera) y MPK5 (Mesón-Perillo) cuyos valores superan el 70%, o las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz) y MPK7 (Bastiaqueiro) con valores entre el 50 y el 60%. La muestra MPK6 (Cecebre) destaca del resto, con un valor inferior al 30%. Estas diferencias en la fracción fina se verán reflejadas en las fracciones de tamaño superior. Así, la fracción correspondiente a arena muy fina, el rango para estas muestras MPK oscila entre un 2 y un 10%, así como para las arenas finas, a excepción de la muestra MPK6 (Cecebre) que alcanza un 18%.

La fracción correspondiente a arena media-gruesa, presenta un rango entre un 1.4% y un 22%. No obstante, se observa como las muestras con una mayor proporción de limos (MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera) y MPK5 (Mesón-Perillo)—las tres presentan valores superiores al 70%, como se comentó anteriormente) son aquellas que presentan una proporción de arenas media-gruesa de un 2.3%, 2.9% y 1.4%, respectivamente. El resto, presenta valores entre el 15% y el 22%. Esta tendencia, aunque con valores generalmente más bajos, también se observa en la fracción de arena gruesa, a excepción de la muestra MPK8 (Vilaboa), en donde esta fracción representa el tamaño de partícula predominante, con un porcentaje del 47.5%, respondiendo, de nuevo, a las diferencias en la naturaleza de los materiales de procedencia. De forma generalizada se puede observar una proporción mayoritaria de materiales de tamaño limo para la fracción fina, predominando la arena media-gruesa dentro de las distintas fracciones de arena, a excepción de la muestra MPK8 (Vilaboa) (Fig. 8.8.6).

**Tabla 18.** Porcentajes de las fracciones granulométricas para el conjunto de muestras MPK correspondientes a los tamaños de partícula de arcilla, limo, arena muy fina (Ar. Muy Fina) y arena fina (Ar. Fina), obtenidas mediante granulometría láser, y las fracciones de arena media-gruesa (Ar. Media-Gruesa) y arena gruesa (Ar. Gruesa) obtenidas a partir de tamizado húmedo.

Método	Granulometría láser				Tamizado húmedo	
	arcilla <2 μm	limo 2—63 μm	Ar. Muy Fina 63-125 μm	Ar. Fina 125—250 μm	Ar. Media-Gruesa 250-1000 μm	Ar. Gruesa >1000 μm
MPK1	5,73	53,73	9,64	10,09	18,36	2,45
MPK2	13,10	59,96	3,97	1,74	15,22	6,02
MPK3	16,84	75,42	3,08	1,44	2,30	0,94
MPK4	13,61	78,42	2,87	1,54	2,97	0,59
MPK5	11,74	80,55	4,22	1,92	1,45	0,13
MPK6	6,14	29,84	10,67	18,36	22,06	12,92
MPK7	8,84	47,32	6,97	2,32	16,23	18,31
MPK8	7,10	19,17	2,64	2,13	21,43	47,53

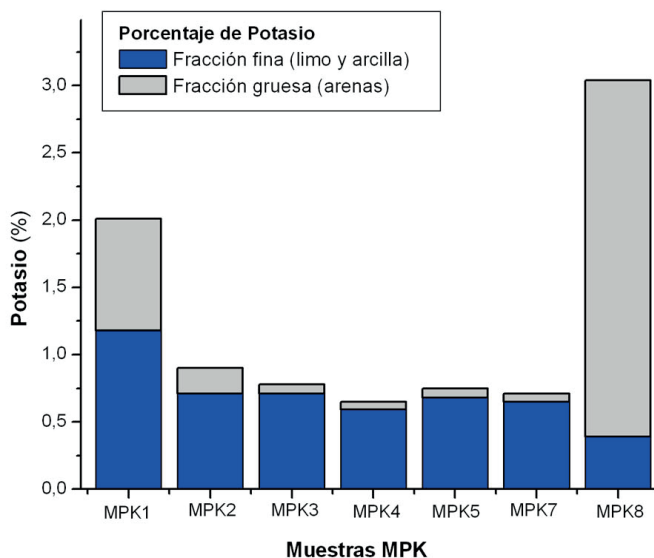


**Figura 8.8.6.** Porcentaje de cada una de las fracciones granulométricas correspondientes para cada una de las muestras MPK. En el INSET se compara la variación en el porcentaje de cada fracción granulométrica (arcilla, limo, arena muy fina (m.f.) arena fina (f.) arena media-gruesa (M-G.) y arena gruesa (G.) que presenta cada una de las muestras MPK.

En el recuadro interno de la misma figura se puede observar como predomina la fracción limosa para las muestras MPK desarrolladas sobre una litología esquistosa, a excepción de la muestra MPK6 (Cecebre), y la correlación que presenta esta fracción con la de tamaño arcilla. Respecto a la muestra MPK8 (Vilaboa), desarrollada a partir de una litología granítica, se observa un predominio de arena gruesa y media.

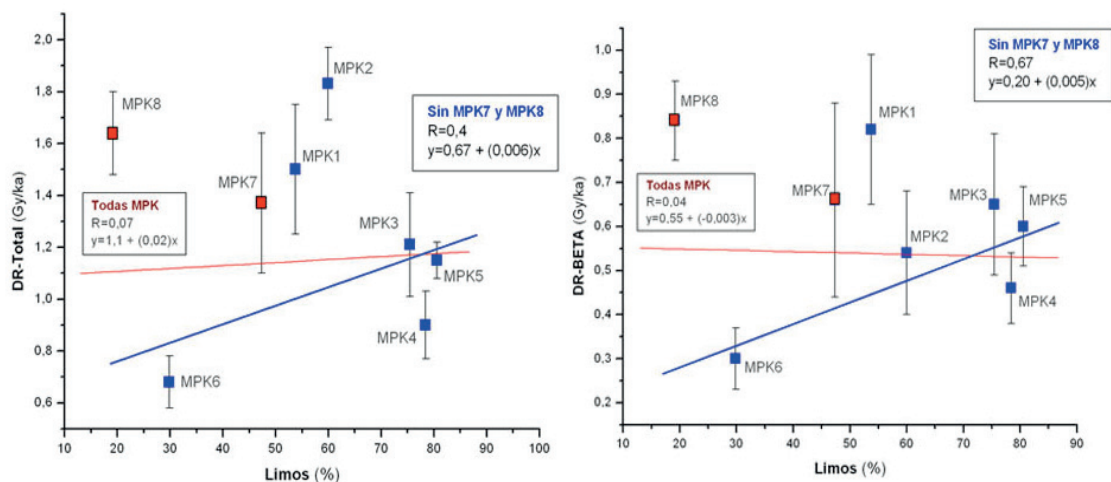
8.1.5.2. Granulometría y relación con la *DR*, con el porcentaje de *OD* y con la proporción de potasio para las muestras MPK.

Una vez estimado las proporciones de cada una de las fracciones granulométricas y la cantidad de potasio de cada una de ellas, se puede obtener una mejor aproximación de las concentraciones de potasio en las fracciones fina ( $<63\mu\text{m}$ ), que incluye arcillas y limos, y gruesa ( $63\text{--}2000\mu\text{m}$ ), que incluye el promedio de las fracciones de arena extraídas, y que se describen en la figura (Fig. 8.8.7), y en donde se puede observar una distribución de potasio heterogénea entre las distintas fracciones, excepto en la muestra MPK1 (Bribes), así como una mayor presencia de este elemento en la fracción fina, a excepción de la muestra MPK8 (Vilaboa), para la cual, la fracción gruesa muestra valores muy superiores.



**Figura 8.8.7.** Porcentaje de potasio normalizado a partir de las proporciones granulométricas correspondientes a la fracción fina ( $<63\mu\text{m}$ : arcillas y limos) y la fracción gruesa ( $63\text{--}2000\mu\text{m}$ ), que incluye todas las fracciones arenosas extraídas de las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo), MPK7 (Bastiaqueiro) y MPK8 (Vilaboa).

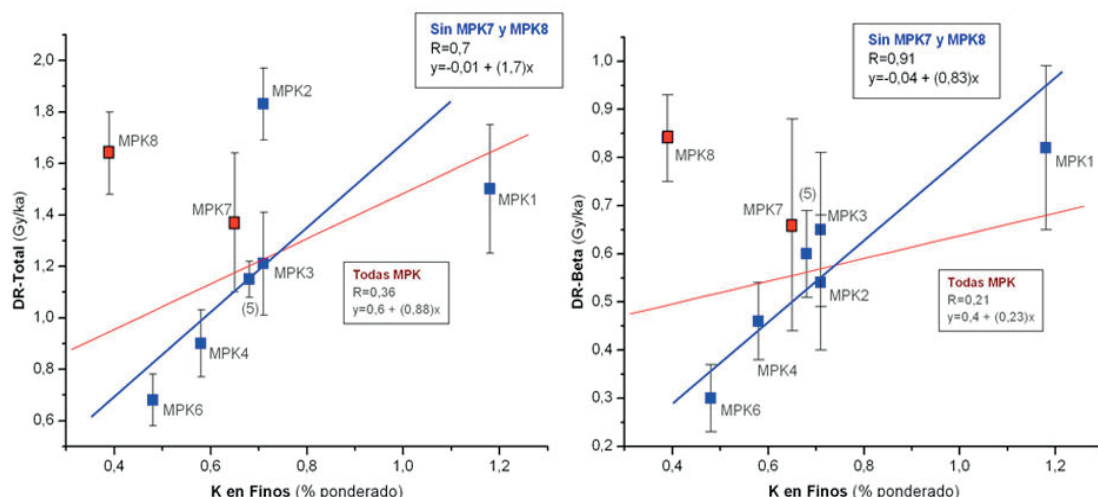
Así, y teniendo en consideración que para las muestras MPK desarrolladas a partir de una litología esquistosa - esto es, todas las muestras MPK excepto MPK8 (Vilaboa)- el potasio se concentra mayoritariamente en la fracción limosa, en la figura (Fig. 8.8.8) se representa la dosis anual total ( $DR_{TOTAL}$ ) y la componente beta ( $DR_{BETA}$ ) frente a la proporción de limos obtenida para las muestras del río Mero (MPK). No obstante, tanto para la  $DR_{TOTAL}$  como para la  $DR_{BETA}$ , sí se observan diferencias entre los resultados obtenidos si se incluyen todas las muestras MPK o si se excluyen las muestras MPK7 (Bastigueiro) y MPK8 (Vilaboa).



**Figura 8.8.8.** Relación entre la  $DR_{TOTAL}$  (izq.) y la  $DR_{BETA}$  (dcha.) respecto al porcentaje de limos (2-63 $\mu$ ) obtenido para las muestras MPK. Se representa la línea de tendencia obtenida mediante un ajuste lineal, con su ecuación ( $y=b+ax$ ) y su coeficiente de correlación R. La línea roja representa a todas las muestras MPK incluidas y la línea azul representa el ajuste realizado a partir de las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre) representadas por cuadrados azules, y excluyendo las muestras MPK7 (Bastigueiro) y MPK8 (Vilaboa), representadas por cuadrados rojos.

Respecto a la  $DR_{BETA}$ , cuando se incluyen todas las muestras se obtiene un coeficiente R inferior a 0.1 que llega hasta valores de 0.4 cuando se excluye las muestras MPK7 (Bastigueiro) -por su bajo porcentaje de  $OD_{EBG}$ - y MPK8 (Vilaboa) -desarrollada sobre granito- del mismo modo que ocurre con la  $DR_{TOTAL}$ , obteniéndose un coeficiente R de 0.04 al incluir todas las muestras, frente a un 0.67 cuando se excluyen las muestras anteriores. Así, para las muestras de una misma litología (esquistos) y con valores de sobre-dispersión muy elevados se observa una marcada tendencia entre la dosis total y su componente beta ( $DR_{BETA}$ ) y la proporción de limos que presentan. Como además, el potasio (y el potasio-40) está presente de forma mayoritaria en estas muestras, se describe a continuación la relación entre la  $DR_{TOTAL}$  y la  $DR_{BETA}$  frente a la concentración de potasio presente en la fracción fina (<63m) (Fig. 8.8.9). No obstante, como la proporción de finos (o fracción

fin) varía de unas muestras a otras, el porcentaje de potasio se pondera con la proporción de finos que presenta cada una de las muestras.

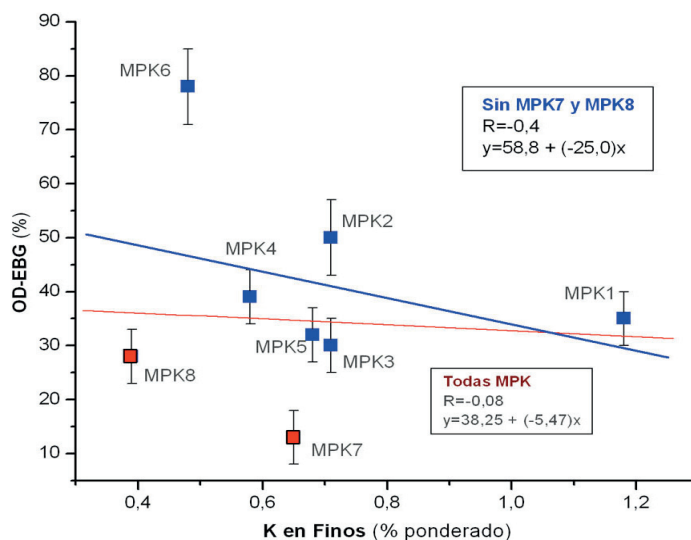


**Figura 8.8.9.** Relación entre la DR-TOTAL (izq.) y la DR-BETA (dcha.) respecto al porcentaje de potasio ponderado por la proporción de finos (<63μ) correspondiente a cada muestra MPK. Se representa la línea de tendencia obtenida mediante un ajuste lineal, con su ecuación ( $y=b+ax$ ) y su coeficiente de correlación R. La línea roja representa a todas las muestras MPK incluidas y la línea azul representa el ajuste realizado a partir de las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre) representadas por cuadrados azules, y excluyendo las muestras MPK7 (Bastiagueiro) y MPK8 (Vilaoa), representadas por cuadrados rojos.

Teniendo en cuenta las tendencias observadas entre la  $OD_{EBG}$  y la  $DR_{BETA}$  y la proporción de potasio con ésta última, así como con la proporción de potasio en la fracción fina (<63μ), se representa a continuación (Fig. 8.8.10) la variación en el porcentaje estimado para la  $OD_{EBG}$  en función de la concentración de potasio ponderada entre la proporción de finos (<63μ) correspondiente a cada muestra MPK. Los resultados obtenidos en este tipo de ajuste lineal, como se puede observar en la misma figura, presentan coeficientes de correlación R con valores de -0,08, cuando se incluyen todas las muestras MPK, y de -0,4 cuando se excluyen las muestras MPK7 y MPK8. De la misma manera, la pendiente de la recta presenta valores de -5,47 en el primer caso, esto es, al incluir todas las muestras, y de -25 al excluir las anteriores. No se puede asumir, por tanto, y para cualquiera de los casos una correlación de tipo lineal clara. No obstante, cuando se incluyen todas las muestras, y según la línea de tendencia obtenida mediante este tipo de ajuste lineal, variaciones de 2 unidades en el porcentaje de potasio presente en la fracción fina supone un porcentaje de la  $OD_{EBG}$  esperada de 27,31% y un 4% de potasio en finos, suponen valores esperados para la  $OD_{EBG}$  del 16,37%. Si, por otra parte, se tiene en cuenta la línea de tendencia obtenida al excluir las muestras MPK7 y MPK8, representada en la misma figura, este descenso de la  $OD_{EBG}$  se magnifica, de modo que, a medida que se incrementa la



proporción de potasio en finos, por ejemplo, un 2%, la  $OD_{EBG}$  esperada cae por debajo del 10%. Según estos resultados, la  $OD_{EBG}$  varía con la proporción de potasio presente en la fracción fina de cada una de las muestras MPK, así como con la dosis radiactiva, principalmente la  $DR_{BETA}$ .



**Figura 8.8.10.** Relación entre la OD-EBG y el porcentaje de potasio ponderado por la proporción de finos ( $<63\mu$ ) correspondiente a cada muestra MPK. Se representa la línea de tendencia obtenida mediante un ajuste lineal, con su ecuación ( $y=b+ax$ ) y su coeficiente de correlación R. La línea roja representa a todas las muestras MPK incluidas y la línea azul representa el ajuste realizado a partir de las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre) representadas por cuadrados azules, y excluyendo las muestras MPK7 (Bastigueiro) y MPK8 (Vilaboa), representadas por cuadrados rojos.

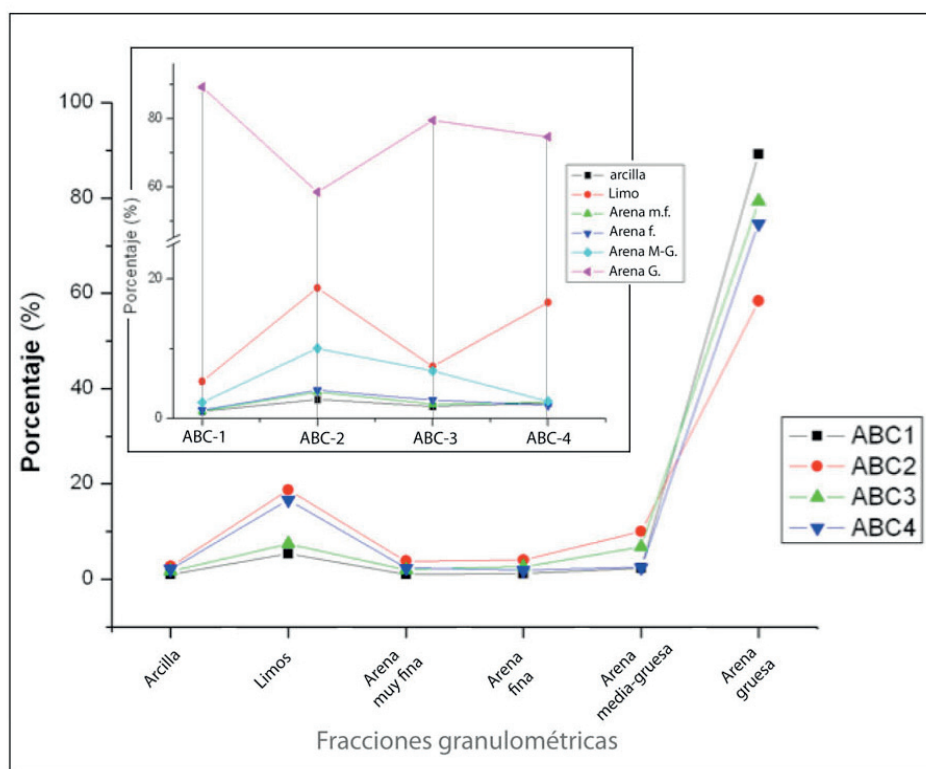
### 8.1.5.3. Granulometría y relación con la $DR$ con el porcentaje de $OD$ y con la proporción de potasio para las muestras ABC.

Las proporciones de las distintas fracciones granulométricas, desde partícula del tamaño de las arcillas ( $<2\mu$ ), limo ( $2-63\mu$ ) arena muy fina ( $63-125\mu$ ), arena fina ( $125-250\mu$ ) y arena media ( $250-500\mu$ ) obtenidas para las muestras ABC, se detallan en la tabla (Tabla 19). Así, y en orden creciente, el porcentaje de la fracción del tamaño arcilla no supera el 2.7%. Por su parte, la proporción de limos no llega a valores del 10% para ABC1 y ABC3, mientras que para ABC2 y ABC4 sobrepasa el 15%. Para la fracción arena muy fina, el porcentaje se sitúa entre 2.2% y 7.8%, y el de arena fina, entre el 2.2 y el 10%. No obstante, será la proporción del tamaño de partícula de arena media la fracción más representativa, con valores entre el 58%, de ABC2, hasta el 89%, para ABC1.

Existe, por tanto, para las muestras ABC una mayor proporción de arena media, superior al 50%, acompañada de una fracción limosa variable entre muestras y nunca superior al 20%. (Fig. 8.8.11).

**Tabla 19.** Fracciones granulométricas para las muestras del río Ulla en Catoira (ABC) correspondientes a los tamaños de partícula de arcilla, limo, arena (Ar.) muy fina, arena fina a partir de granulometría laser, y fracción de arena media a partir de tamizado seco.

Muestras	Granulometría láser				Tamizado seco
	% Arcilla <2 $\mu\text{m}$	% Limo 2—63 $\mu\text{m}$	% Ar. Muy fina 63-125 $\mu\text{m}$	% Ar. Fina 125—250 $\mu\text{m}$	% Ar. Media 250-500 $\mu\text{m}$
ABC-1 (Borreiros)	1,00	5,31	2,22	2,28	89,19
ABC-2 (Borreiros)	2,70	18,71	7,85	10,03	58,41
ABC-3 (Borreiros)	1,73	7,43	4,62	6,82	79,39
ABC-4 (Sta.Eulalia)	2,16	16,63	4,18	2,43	74,59



**Figura 8.8.11.** Porcentaje de cada una de las fracciones granulométricas correspondientes para cada una de las muestras ABC. En el recuadro interno se compara la variación en el porcentaje de cada fracción granulométrica (arcilla, limo, arena muy fina (m.f.) arena fina (f.) arena media-gruesa (M-G.) y arena gruesa (G.) que presenta cada una de las muestras ABC.

En la siguiente figura (Fig.8.8.12) se representa la relación entre la  $DR_{TOTAL}$  y la  $DR_{BETA}$  con la proporción de limos. Ambas presentan coeficientes de correlación R por encima de 0.9, y una pendiente de 0.9 y 0.48 respectivamente. En base a estos valores obtenidos se puede asumir una correlación lineal significativa entre ambas variables, si bien, el número de muestras es muy reducido.

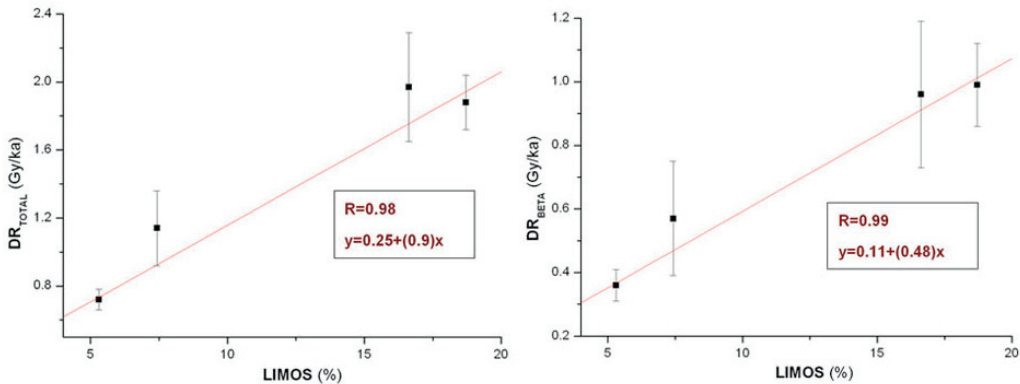


Figura 8.8.12. Relación entre la  $DR_{TOTAL}$  (izq.) y la  $DR_{BETA}$  (dcha.) y la proporción de limos para las muestras ABC, incluyendo el coeficiente de correlación (R) y la recta de regresión lineal.

Por otra parte, no se observa una correlación evidente entre la fracción de limos y la  $OD_{EBG}$  para ABC (Fig. 8.8.13), de la misma manera que ocurría con la  $OD_{EBG}$  y la  $DR_{BETA}$  para estas muestras, mostrando incluso una línea tendencia de signo negativo (Fig. 8.8.2).

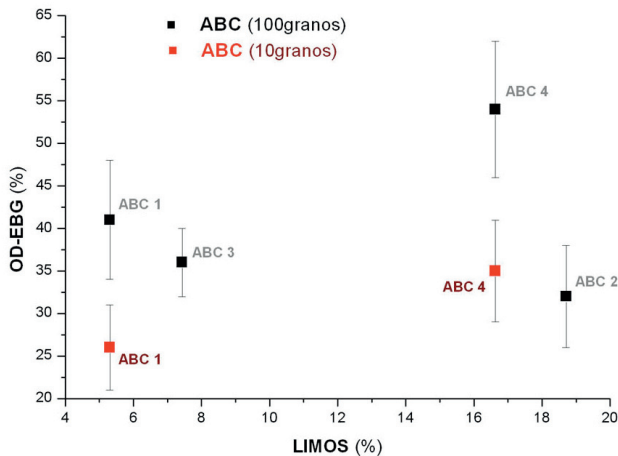


Figura 8.8.13. Correlación entre la fracción de tamaño de partícula correspondiente a limos (2-63micras) y el porcentaje de  $OD_{EBG}$  (%) en los que se incluyen los valores pertenecientes a un tamaño de alícuota de 100 granos para las muestras ABC (cuadrado negro) y aquellos correspondientes a un tamaño de alícuota de 10 granos (cuadrado rojo) para ABC1 y ABC4.

#### 8.1.6. Estimación de la dosis equivalente (De) y rango de edad.

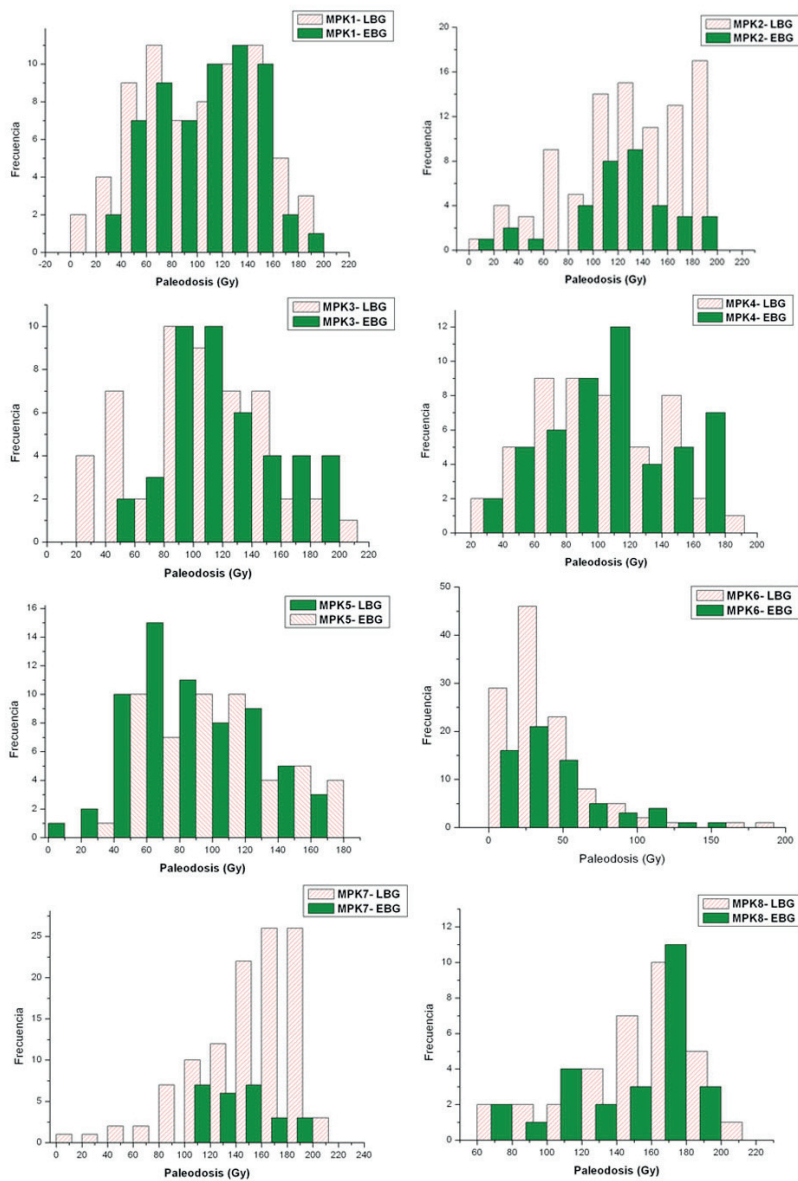
A continuación se describirán la distribución que presentan las estimaciones individuales obtenidas con cada una de las alícuotas aceptadas para las muestras MPK y ABC a partir de las señales obtenidas empleando los métodos LBG y EBG de integración de la señal, así como la estimación de la *De* proporcionadas a partir de los modelos de edad empleados (CAM, MAM, IEU), para pasar, posteriormente, a una descripción más detallada de la distribución de las estimaciones y el cálculo de un rango de edad fiable para cada muestra.

##### 8.1.6.1. Distribución de los datos y pruebas de normalidad para las muestras MPK y ABC.

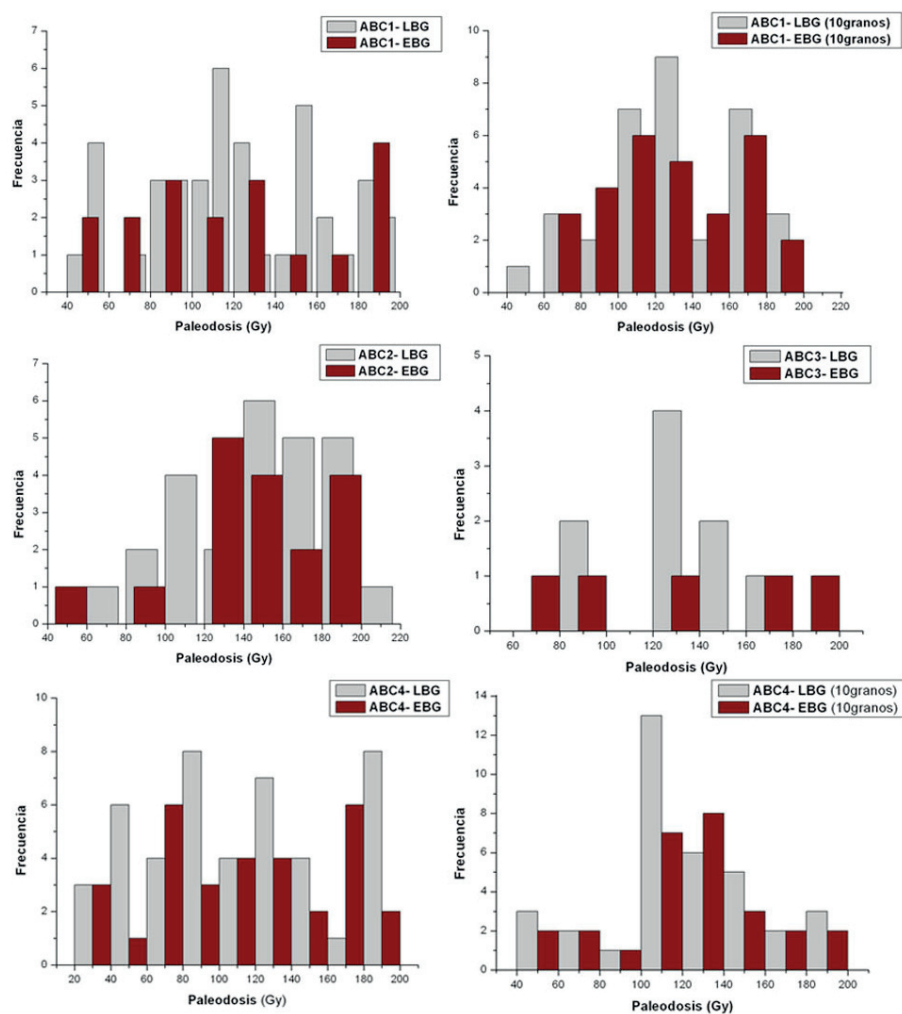
En las figuras siguientes (Fig. 8.9.1 y 8.9.2) se representan los diagramas de frecuencia par las muestras MPK y ABC, incluyendo en ellos las estimaciones de la *De* de cada una de las alícuotas que interpolan por debajo de la zona lineal de saturación de la curva de crecimiento OSL (establecida por convenio en 200Gy). En ellos se compara, sin incluir el error asociado, la distribución de los datos a partir de los métodos de integración LBG y EBG, divididos en clases de 20Gy.

Para las muestras MPK (Fig. 8.9.1) se observa, en general, una amplia dispersión y similitud en las distribuciones de los datos obtenidos a partir de la señal OSL extraída mediante el método LBG así como el la señal OSL extraída mediante el método EBG, a pesar de las diferencias en el número de alícuotas aceptadas, generalmente superior para el método LBG, y que se traduce en valores mayores en la frecuencia de las estimaciones. No obstante, no se puede definir a simple vista y de forma clara el tipo de distribución y la ausencia o no de asimetría en la misma.

Respecto las muestras ABC, al igual que ocurre con MPK, hay similitud entre las estimaciones obtenidas mediante el método LBG y EBG, con distribuciones muy amplias, ausencia de asimetría y en las cuales no se observa claramente la presencia de una única población, aspectos que también atañen a los tamaño de alícuota de 10 granos para las muestras ABC1 y ABC4 (Fig. 8.9.2).



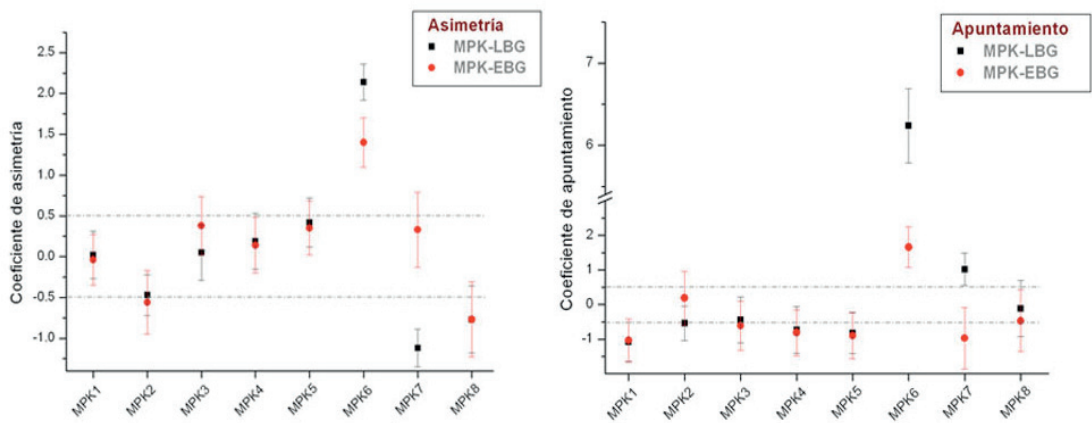
**Figura 8.9.1.** Diagramas de frecuencia absoluta de las estimaciones de la paleodosis -término en desuso para la dosis equivalente (De)-por debajo del límite de saturación de la señal OSL(<200Gy) obtenidas mediante los métodos de integración LBG (rojo-rayado) y EBG (en verde), para las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), MPK7 (Bastiaqueiro) y MPK8 (Vilaboa).



**Figura 8.9.2.** Diagramas de frecuencia absoluta de las estimaciones de la paleodosis -término en desuso para la dosis equivalente (De)-por debajo del límite de saturación de la señal OSL(<200Gy) obtenidas mediante los métodos de integración LBG (en gris) y EBG (en rojo), para las muestras ABC1, ABC2 y ABC3 (Borreiros, Catoira) y ABC4 (Santa Eulalia, Catoira).

Las medidas de distribución como la asimetría y apuntamiento se representan en la figura (Fig. 8.9.3). Respecto a la asimetría, se puede observar como los datos de las muestras MPK, y a excepción de la muestra MPK6 (LBG y EBG), se distribuyen de manera uniforme alrededor de la media aritmética, teniendo en cuenta que la mayoría de los valores se ubican dentro del rango  $\pm 0.5$ , intervalo dentro del cual existe un grado de simetría considerable. Únicamente, la distribución para MPK7-LBG, así como para MPK8 (para LBG y EBG), se observa cierto grado de asimetría (negativa). Para MPK6, tanto para LBG como para EBG, el grado de asimetría, en este caso, positiva, es más acusado.

Respecto al grado de apuntamiento, la tendencia es similar y la mayoría de los valores se incluyen dentro del rango  $\pm 0.5$ , con una distribución similar a las que seguiría una de tipo normal. Las excepciones a esta tendencia son la muestra MPK6-LBG con un coeficiente de muy superior al resto, de  $6.24 \pm 0.45$ , MPK6-EBG con un valor de  $1.66 \pm 0.59$ , MPK1-LBG con  $-1.08 \pm 0.57$  y, finalmente, MPK7-LBG con un coeficiente de  $1.02 \pm 0.46$ . Esto significa que las muestra MPK6 y MPK7-LBG presentan un apuntamiento considerable, con la mayoría de los datos aglutinados en torno a la media, mientras que la muestra MPK1-LBG se caracteriza por una mayor dispersión, con datos alejados de los valores centrales.



**Figura 8.9.3.** Coeficiente de asimetría (izq.) y apuntamiento (dcha.) a partir de las estimaciones obtenidas para las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), MPK7 (Bastiaqueiro) y MPK8 (Vilaboa), empleando los métodos LBG y EBG.



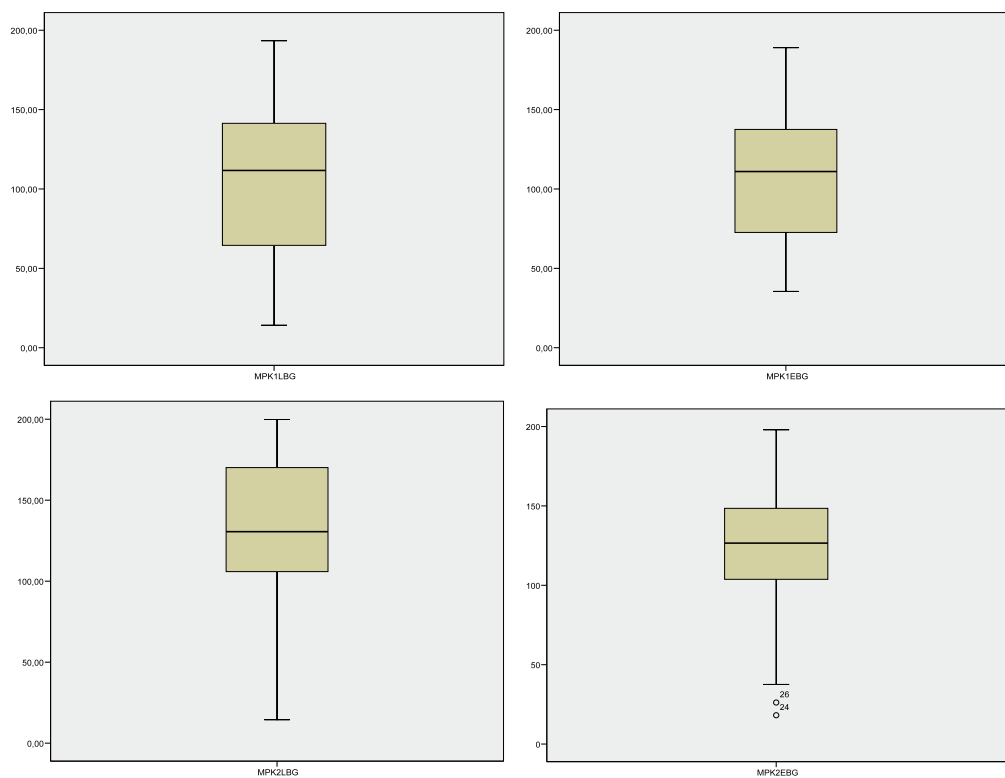
En la tabla (Tabla 20) se describen los resultados obtenidos en las pruebas de normalidad realizadas para las muestras MPK empleando los métodos de integración LBG y EBG. En estas pruebas, como la de Kolmogorov-Smirnov (que incluye la corrección de Lilliefors), o la prueba de Shapiro-Wilks para muestras cuyo número total de datos es inferior a 50, se contrasta, la hipótesis nula según la cual los datos procedentes de una población siguen una distribución de tipo normal. En base a los datos obtenidos y, empleando un nivel de significación  $\alpha=0.01$ , no se rechazaría dicha hipótesis nula para las muestras MPK obtenidos mediante el método EBG, a excepción de MPK6, asumiéndose que los datos pertenecen a una única población cuya distribución se ajusta a una de normal.

**Tabla 20.** Número de datos (N), coeficiente de asimetría y apuntamiento con su error típico, y valores de los estadísticos y nivel de significación para las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov incluyendo la corrección de Lilliefors (K-S (Lillier.)) y la de Shapiro-Wilks (S-W, para  $N < 50$ ).

Muestra	N	Asimetría	Apuntamiento	K-S (Lillier.)	Sig.	S-W (N<50)	Sig.
MPK1-LBG	69	0.02±0.29	-1.08±0.57	0.117	0.020		
MPK1-EBG	59	-0.04±0.31	-1.03±0.61	0.096	0.200		
MPK2-LBG	92	-0.47±0.25	-0.54±0.50	0.087	0.080		
MPK2-EBG	37	-0.56±0.39	0.19±0.77	0.118	0.200	0.959	0.203
MPK3-LBG	50	0.05±0.34	-0.44±0.66	0.093	0.200	0.974	0.336
MPK3-EBG	43	0.38±0.36	-0.61±0.71	0.112	0.200	0.958	0.120
MPK4-LBG	49	0.19±0.34	-0.73±0.67	0.086	0.200	0.977	0.430
MPK4-EBG	50	0.14±0.34	-0.81±0.66	0.084	0.200	0.973	0.314
MPK5-LBG	62	0.42±0.30	-0.82±0.60	0.101	0.193		
MPK5-EBG	52	0.35±0.33	-0.90±0.66	0.108	0.200		
MPK6-LBG	116	2.14±0.22	6.24±0.45	0.182	0.000		
MPK6-EBG	65	1.40±0.30	1.66±0.59	0.182	0.000		
MPK7-LBG	108	-1.12±0.23	1.02±0.46	0.185	0.003		
MPK7-EBG	26	0.33±0.46	-0.97±0.89	0.118	0.200	0.934	0.097
MPK8-LBG	32	-0.77±0.41	-0.11±0.81	0.122	0.200	0.938	0.067
MPK8-EBG	26	-0.77±0.46	-0.47±0.89	0.175	0.040	0.912	0.030

En las figuras (Fig. 8.9.4, 8.9.5, 8.9.6 y 8.9.7) se representa la distribución de las estimaciones de las muestras MPK obtenidas empleando los métodos LBG y EBG en forma de diagrama de cajas. De forma generalizada, el 95% de los datos, así como el primer y tercer cuartil, abarcan un rango de valores muy amplio y disperso. Además, y a excepción de las muestras MPK2 (Sta.Cruz), MPK7 (Bastiaqueiro) y MPK8 (Vilaboa), no se observan grandes diferencias entre los métodos LBG y EBG. Para la muestra MPK2 (Fig. 8.9.4 y Tabla 20), la distribución del 95% de los datos, el grado de significación y el coeficiente de asimetría es similar a pesar de la diferencia de alícuotas entre los métodos LBG y EBG (92 y 37 respectivamente). No obstante, para el método EBG se observan datos atípicos situados en valores de dosis muy bajos. Por su parte, la muestra MPK6 (Cecebre), con una distribución muy asimétrica y que no sigue una normal, tanto para LBG y EBG, presenta un número de datos atípicos considerable caja (Fig. 8.9.6), situados, todos ellos a dosis por encima de los 80Gy (el 95% de los datos se ubican, para LBG, entre cero y 80Gy, y para EBG entre 0 y 90Gy).

Respecto a la muestra de Bastiaqueiro MPK7 (Fig. 8.9.7 y Tabla 20) sí se observan diferencias entre los métodos LBG y EBG. Así, empleando el método EBG y con un número final de alícuotas de 26, la distribución sigue una normal, sin asimetría, sin datos atípicos. No obstante, mediante el método LBG, con un número de alícuotas de 108, se rechaza la hipótesis según la cual la distribución es de tipo normal y hay un cierto grado de asimetría negativa, esto es, con valores distribuidos por encima de la media y cola larga hacia los valores más bajos, como muestra el diagrama de cajas para MPK7 obtenido mediante el método LBG en el que se observa, además, un dato atípico por debajo de los 40Gy y que coincide, además, con la estimación del modelo  $MAM_{LBG}$  de  $40 \pm 4$ Gy. En la misma figura, y para la muestra MPK8 (Vilaboa), el 95% de los datos obtenidos mediante el método LBG y EBG, con un número de 32 y 26 alícuotas respectivamente, se distribuyen dentro del mismo rango (entre 60 y 200Gy). No obstante, para los datos obtenidos de esta muestra MPK8 mediante el método EBG se observa cierta asimetría respecto a LBG. Como ya se ha comentado, el coeficiente de asimetría es de -0.77 y, como se puede observar, la mediana se desvía hacia el tercer cuartil – a lo que habría que sumar que,, bajo un nivel de significación del 5%, se rechazaría la hipótesis nula para esta muestra, si bien, como se ha comentado anteriormente, a un nivel de significación del 1% no se rechazaría dicha hipótesis. Estos aspectos están condicionados, probablemente, al reducido número de datos obtenidos, debido al gran número de alícuotas que no interpolan o que lo hacen dentro de la zona de saturación de la señal OSL para MPK8 (Vilaboa). A pesar de estas diferencias, las  $De$  estimadas mediante los modelos  $CAM_{LBG}$  y  $CAM_{EBG}$  se solapan, con valores de  $143 \pm 8$ Gy y  $139 \pm 9$ Gy, respectivamente.



**Figura 8.9.4.** Diagrama de cajas de la distribución de los datos de las muestras MPK1 (Bribes) y MPK2 (Sta.Cruz). Eje Y: De (Gy).

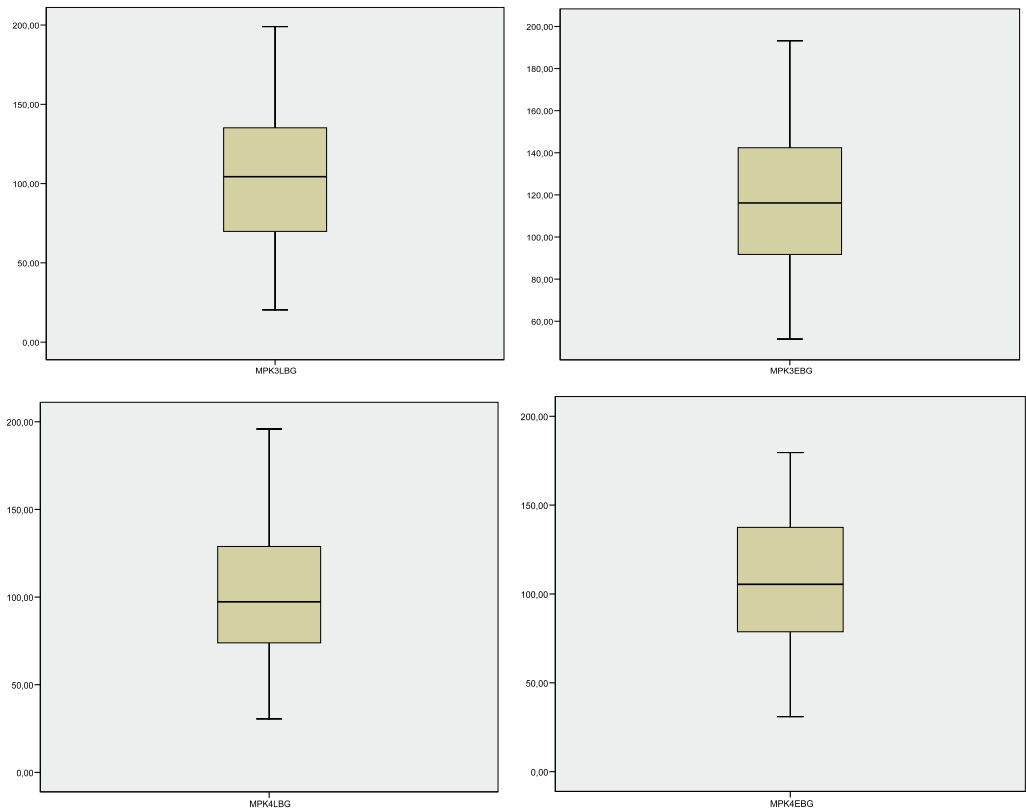
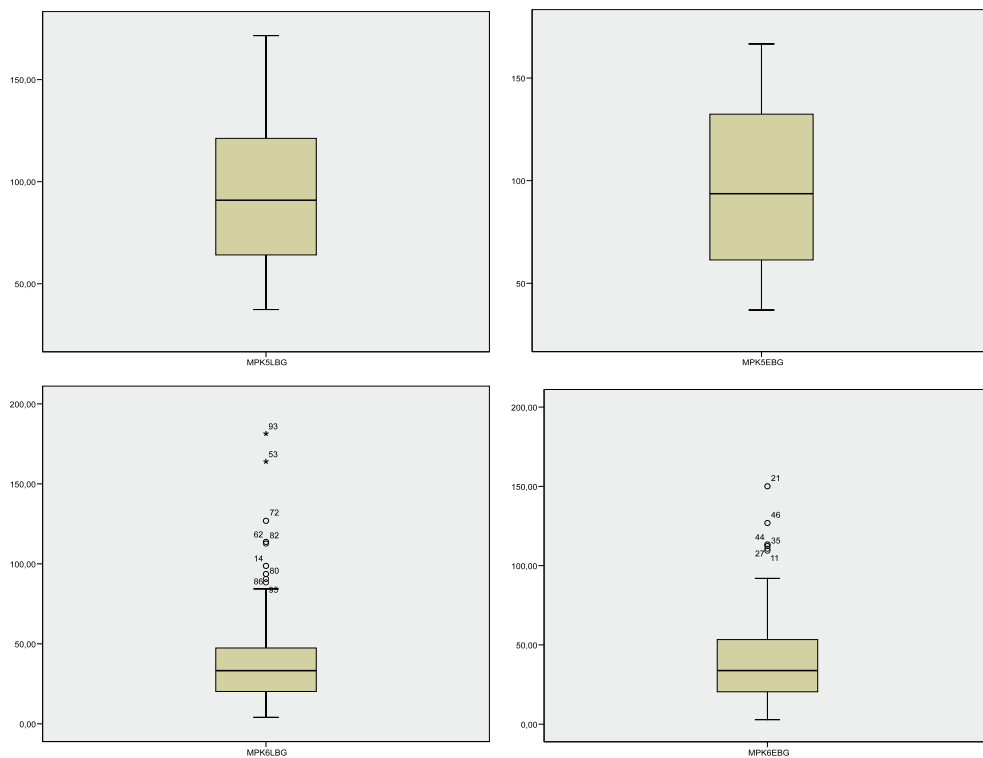
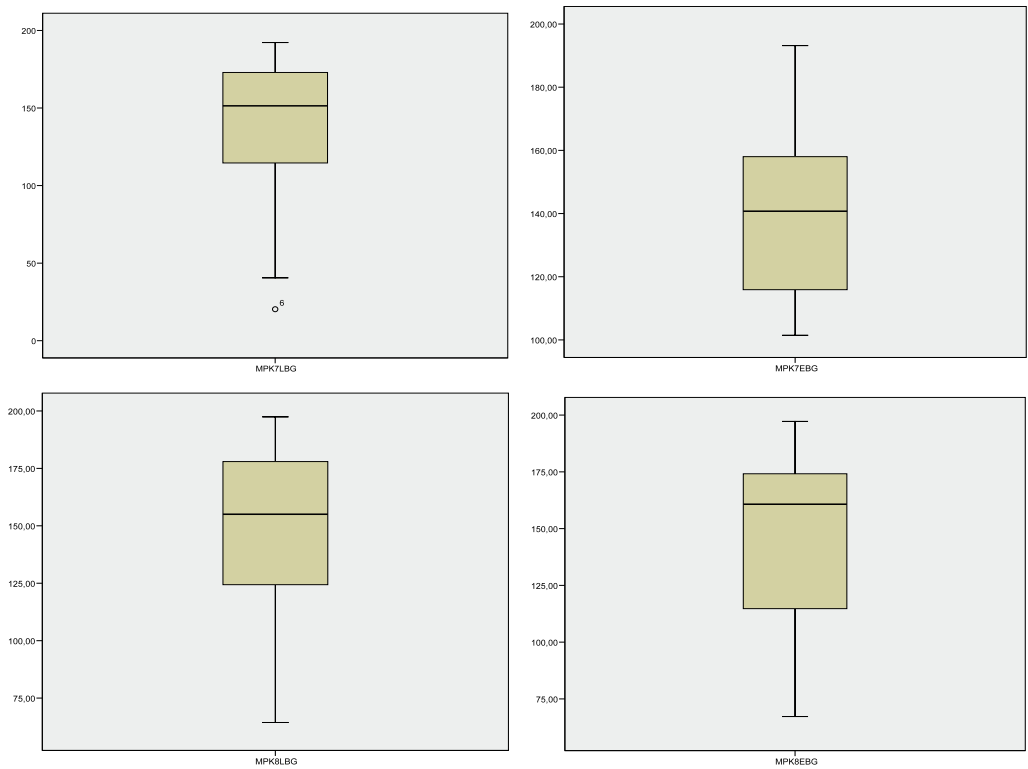


Figura 8.9.5. Diagrama de cajas de la distribución de los datos de las muestras MPK3 (Dorneda) y MPK4 (Mera). Eje Y: De (Gy).



**Figura 8.9.6.** Diagrama de cajas de la distribución de los datos de las muestras MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre). Eje Y: De (Gy).



**Figura 8.9.7.** Diagrama de cajas de la distribución de los datos de las muestras MPK7 (Bastiaguero) y MPK8 (Vilaboa). Eje Y: De (Gy).

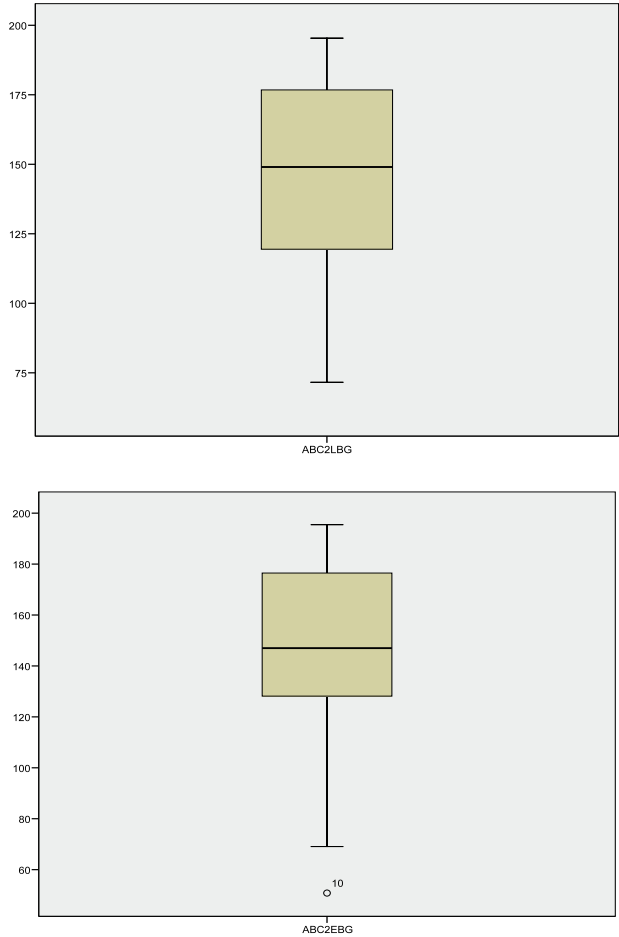
Respecto a las muestras del río Ulla en Catoira (ABC), también se han estimado las mismas medidas de distribución (asimetría y apuntamiento) y pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilks) a partir de las muestras ABC1, ABC2 (Borreiros) y ABC4 (Santa Eulalia). Como se describe en la Tabla (Tabla 21), el grado de asimetría está incluido dentro del rango  $\pm 0.5$  y el de apuntamiento en el de  $\pm 1.0$ , por lo que las distribuciones, son simétricas y, aparentemente, la mayoría de los datos están próximos a la media aritmética.

**Tabla 21.** Número de datos (N), coeficiente de asimetría y apuntamiento con su error típico, y valores de los estadísticos y nivel de significación para las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov incluyendo la corrección de Lilliefors (K-S (Lillier.)) y la de Shapiro-Wilks (S-W, para  $N < 50$ ). Para ABC1 y ABC4 también se incluye el análisis con un tamaño de alícuota de 10 granos.

Muestras	N	Asimetría	Apuntamiento	K-S(a)	(a) Sig.	S-W Sig.	Sig.
ABC1-LBG	40	-0.01 $\pm$ 0.37	-0.91 $\pm$ 0.73	0.10	0.20	0.964	0.350
ABC2-LBG	32	-0.48 $\pm$ 0.41	-0.72 $\pm$ 0.81	0.10	0.20	0.944	0.095
ABC4-LBG	45	0.17 $\pm$ 0.35	-1.04 $\pm$ 0.69	0.09	0.20	0.960	0.267
ABC1-LBG (10granos)	34	-0.05 $\pm$ 0.40	-0.77 $\pm$ 0.79	0.12	0.20	0.967	0.416
ABC4-LBG (10granos)	33	-0.07 $\pm$ 0.41	-0.40 $\pm$ 0.80	0.12	0.20	0.961	0.288
ABC1-EBG	23	-0.11 $\pm$ 0.48	-1.23 $\pm$ 0.93	0.15	0.20	0.941	0.186
ABC2-EBG	23	-0.79 $\pm$ 0.48	0.48 $\pm$ 0.93	0.14	0.20	0.925	0.086
ABC4-EBG	27	0.21 $\pm$ 0.45	-1.00 $\pm$ 0.87	0.12	0.20	0.962	0.510
ABC1-EBG (10granos)	29	0.10 $\pm$ 0.43	-1.14 $\pm$ 0.85	0.14	0.20	0.950	0.286
ABC4-EBG (10granos)	27	-0.17 $\pm$ 0.45	-0.40 $\pm$ 0.87	0.15	0.20	0.957	0.411

Cabe destacar que la muestra ABC2-EBG (en la misma tabla) con un número de alícuotas de 23, presenta una ligera asimetría negativa que viene reforzada por un dato atípico (*outlier*) observado en el diagrama de cajas (Fig. 8.9.8) y que se corresponde con el modelo  $MAM_{EBG}$  cuya estimación de la De es de  $54 \pm 4$  Gy. No obstante, en base a los resultados obtenidos en las pruebas de normalidad realizadas a un nivel de significación de  $\alpha=0.05$ , no se rechaza la hipótesis nula según la cual la población de datos de estas muestras siguen una distribución de tipo normal.





**Figura 8.9.8.** Diagrama de cajas de la distribución de los datos de la muestra ABC2 (Borreiros, Catoira). Eje Y: De (Gy).

8.1.6.2. Consideraciones generales en las estimaciones de la *De* para MPK y ABC.

En las tablas (Tabla 22 y Tabla 23) se describen, para las muestras MPK (cuenca del río Mero) y ABC (río Ulla en Catoira), respectivamente, las estimaciones de *De* a partir de los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración (LBG y EBG) e incluyendo, además y a modo de comparativa, la media aritmética de la distribución con su desviación típica y la mediana. A excepción de las muestras ABC2 y ABC3 (Borreiros, Catoira), para el resto de muestras se han excluido aquellas estimaciones iguales o superiores a 200Gy, la cuales interpolan en la zona lineal de saturación. De forma generalizada, el número de alícuotas finalmente incluidas en los modelos es inferior al 50% del total de alícuotas analizadas, aspecto que se relaciona con una

señal OSL de baja intensidad, baja sensibilidad y, en algunos casos, porcentajes considerables de saturación de la propia señal. Respecto a los estimadores centrales, la media aritmética no varía respecto a la mediana, describiendo distribuciones que, independientemente de su dispersión, tienden hacia un valor promedio. Por último, si se comparan los resultados obtenidos en función del método de integración LBG o EBG, no se observan grandes variaciones al estimar las *De* mediante el modelo CAM. Las diferencias aparecen, en todo caso, para los modelos IEU y MAM.

**Tabla 22.** Estimación de la *De* (Gy) y su error asociado para las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), MPK7 (Bastigueiro) y MPK8 (Vilaboa), empelado los métodos LBG y EBG, para cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU. (N) Número de alícuotas incluidas en la estimación; (OD) Sobre-dispersión. En las muestras con asterisco (\*) se han excluido las alícuotas cuya *De* estimada es igual o mayor a los 200Gy.

Muestras (LBG/EBG)	N	Media arit. y s.d. (Gy)	Mediana (Gy)	De CAM (Gy)	OD (%)	De MAM (Gy)	De IEU (Gy)
MPK1-LBG*	69/141	103,00±47,01	111,67	92,34±6,61	51±5	14,23±2,30	41,31±4,39
MPK1-EBG*	59/141	106,26±38,44	110,98	98,57±6,03	35±5	36,82±2,65	58,99±4,90
MPK2-LBG*	92/202	131,17±46,97	130,56	119,12±7,14	48±4	14,49±1,45	44,00±4,65
MPK2-EBG*	36/202	120,99±43,62	126,57	107,89±10,54	50±7	19,08±21,26	45,01±6,59
MPK3-LBG*	50/168	103,56±42,59	104,34	91,14±7,19	49±6	20,33±1,72	41,53±3,94
MPK3-EBG*	43/168	119,83±37,74	116,16	115,20±7,01	30±5	60,71±7,05	100,80±7,16
MPK4-LBG	49/91	104,04±39,33	97,30	96,64±6,30	40±5	30,54±2,14	38,96±2,93
MPK4-EBG	51/91	106,66±39,36	105,44	94,72±6,35	39±5	40,44±2,43	46,88±3,16
MPK5-LBG	65/125	92,21±37,47	89,68	84,26±5,67	43±5	25,62±1,88	45,96±4,31
MPK5-EBG*	51/125	97,64±36,93	93,14	88,70±5,67	32±5	55,43±4,13	68,85±5,63
MPK6-LBG	116/188	39,48±30,02	33,22	30,52±2,20	70±5	4,48±0,42	11,44±1,12
MPK6-EBG	65/188	43,05±32,19	33,82	31,61±3,28	78±7	3,85±0,34	7,43±1,25
MPK7-LBG*	108/219	151,14±37,85	159,19	144,99±6,02	30±3	40,19±4,79	114,83±5,48
MPK7-EBG*	26/219	142,10±29,42	140,73	135,43±6,85	13±5	133,10±5,31	125,47±7,25
MPK8-LBG*	32/195	149,02±34,98	155,03	143,97±7,98	26±4	75,57±4,87	110,83±7,80
MPK8-EBG*	26/195	147,58±36,67	160,73	139,58±9,02	28±5	74,92±2,81	100,23±7,02

**Tabla 23.** Estimación de la *De* (Gy) y su error asociado para las muestras ABC1, ABC2 y ABC3 (Borreiros, Catoira) y la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira) empelado los métodos LBG y EBG, para cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU. (N) Número de alícuotas incluidas en la estimación; (OD) Sobre-dispersión. En las muestras con asterisco (\*) se han excluido las alícuotas cuya *De* estimada es igual o mayor a los 200Gy.

Muestras (LBG/EBG)	N	Media (arit.) y s.d. (Gy)	Mediana (Gy)	De CAM (Gy)	OD (%)	De MAM (Gy)	De IEU (Gy)
ABC1-LBG*	27/118	166,55±64,89	158,72	114,58±7,36	37±4	56,64±2,38	92,47±6,29
ABC1-LBG* (10granos)	34/133	132,01±36,88	126,88	126,79±7,44	27±4	68,51±3,93	110,47±7,14
ABC1-EBG*	23/118	193,54±107,35	179,95	118,05±10,99	41±7	41,53±3,62	88,55±9,89
ABC1-EBG* (10granos)	29/133	129,47±36,57	124,99	125,12±7,83	26±5	64,88±16,27	129,77±8,20
ABC2-LBG*	32/168	146,53±36,42	149,03	141,46±7,82	27±4	71,96±2,82	108,93±7,85
ABC2-EBG*	23/168	145,09±38,95	147,00	138,37±10,10	32±5	59,93±4,04	98,99±8,57
ABC3-LBG	47/83	269,09±87,20	282,74	251,93±15,45	38±4	91,85±3,55	135,10±14,98
ABC3-EBG	38/83	272,78±85,99	266,94	256,31±16,67	36±4	78,18±15,59	151,94±14,32
ABC4-LBG*	45/86	140,38±77,76	128,82	98,97±10,19	53±6	25,34±1,50	51,46±5,50
ABC4-LBG* (10granos)	33/112	126,29±40,87	121,65	118,71±9,78	34±5	52,15±3,65	78,20±7,22
ABC4-EBG*	27/86	160,99±107,92	131,07	92,94±10,09	54±8	27,12±1,67	58,73±7,89
ABC4-EBG* (10granos)	27/112	121,09±39,57	121,02	113,37±9,25	35±6	45,06±4,04	83,34±9,30

Un modo de visualizar de forma sencilla algunos de los problemas que se presentan las estimaciones individuales hace referencia al porcentaje de alícuotas que, una vez extraída y analizada la señal OSL normalizada, presentan estimaciones en la zona de saturación, curvas de crecimiento con errores o aberraciones, o respecto al porcentaje de alícuotas que no superan el test de reciclaje como motivo principal de desestimación de alícuotas, así como la proporción de ellas que finalmente son aceptadas (Tabla 24), para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG.

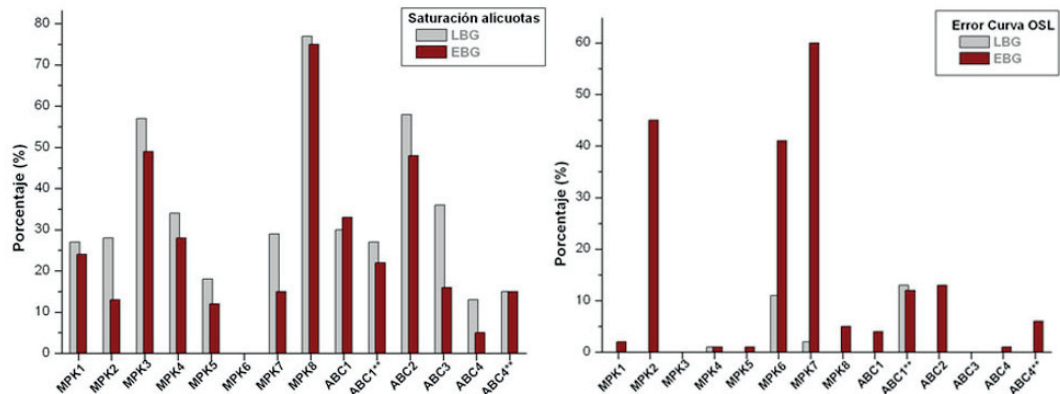
**Tabla 24.** Porcentaje de alícuotas que no interpolan (Saturación), que presentan error o aberraciones en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan el test de reciclaje (Test Reciclaje Negativo) para las muestras del río Mero -MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), MPK7 (Bastigueiro) y MPK8 (Vilaboa)- y las muestras del río Ulla -ABC1, ABC2 y ABC3 (Borreiros, Catoira) y la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira)- empleando los métodos LBG y EBG. (\*) Tamaño de alícuota de 10 granos (10g) para ABC1 y ABC4. El resto de muestras tienen un tamaño de alícuota de 100 granos.

Muestra	Saturación		Error curva OSL		Alícuotas aceptadas		Test Reciclaje Negativo	
	LBG	EBG	LBG	EBG	LBG	EBG	LBG	EBG
MPK1	27	24	0	2	70	60	17	12
MPK2	28	13	0	45	70	44	26	71
MPK3	57	49	0	0	76	52	25	33
MPK4	34	28	1	1	87	72	8	21
MPK5	18	12	0	1	65	48	34	31
MPK6	0	0	11	41	64	35	25	15
MPK7	29	15	2	60	77	52	47	10
MPK8	77	75	0	5	95	87	4	11
ABC1	30	33	0	4	76	51	15	36
ABC1-10g (*)	27	22	13	12	56	48	24	33
ABC2	58	48	0	13	98	30	1	3
ABC3	36	16	0	0	88	56	11	31
ABC4	13	5	0	1	74	47	16	45
ABC4-10g (*)	15	15	0	6	45	34	32	35

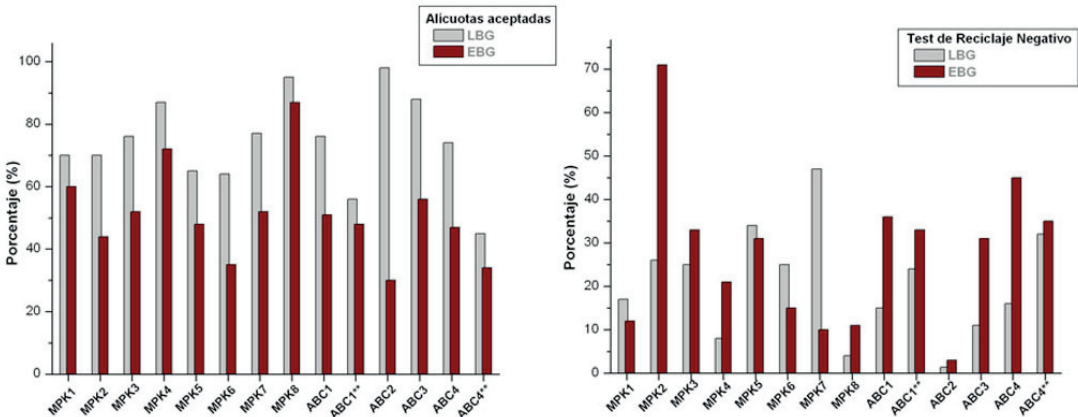
En la figura (Fig. 8.9.9) se puede observar la variabilidad en el porcentaje de alícuotas que presentan una estimación por encima de la mayor dosis regenerada en la curva de crecimiento y, por lo tanto, no interpolan porque la señal OSL normalizada que presentan está saturada. Estos porcentajes varían entre un 10% y más del 70% (a excepción de la muestra MPK6 (Cecebre) cuyo porcentaje es cero). Además, en el mismo gráfico se comparan los resultados obtenidos mediante el método de integración de la señal LBG y el método EBG, sin que se aprecien grandes diferencias entre ambos. En el gráfico de la derecha de la misma figura (Fig. 8.9.9), el porcentaje de alícuotas que presentan una curva de crecimiento con errores o aberraciones (y que genera el programa *Analyst* en función del tipo de ajuste seleccionado, en este caso exponencial+lineal) es prácticamente insignificante para el método LBG, con valores que generalmente están por debajo del 10%, pero que, para el método EBG pueden llegar hasta un 40% o más, como es el caso de MPK2 (Sta.Cruz), MPK6 (Cecebre) y MPK7 (Bastigueiro), o superar el 10% como la muestra ABC1 (Borreiros) con un tamaño de alícuota de 100 granos y de 10 granos.

Respecto al porcentaje de alícuotas que superan los criterios de aceptación para las muestras MPK (río Mero) y ABC (río Ulla), varían también entre el 50 y el 98% para el método LBG y entre el 30 y el 90% para el método EBG, como se puede observar en la gráfica de la izquierda de la figura (Fig. 8.9.10). Además de aquellas alícuotas que no interpolan o que presentan una curva de crecimiento OSL errónea o con aberraciones, el

porcentaje de alícuotas que no supera el test de reciclaje y, por tanto, son descartadas, oscilan de forma muy variable entre el 5 y el 40%, independientemente del método de integración LBG o EBG, si bien, como se puede observar en la misma figura, la muestra MPK2 (Sta. Cruz) presenta valores de hasta un 70% mediante el modelo EBG.



**Figura 8.9.9.** Porcentaje de alícuotas que no interpolan y cuyas estimaciones se sitúan por encima de la dosis regenerada más elevada en la curva de crecimiento, en la zona de saturación (izq.) y porcentaje de alícuotas cuya curva de crecimiento OSL presenta error o aberraciones (dcha.), para las muestras del río Mero -MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), MPK7 (Bastiagueiro) y MPK8 (Vilaboa)- y las muestras del río Ulla - ABC1, ABC2 y ABC3 (Borreiros, Catoira) y la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira)- y empleando los métodos LBG y EBG. Las muestras ABC1\*\* y ABC4\*\* tienen un tamaño de alícuota de 10 granos.



**Figura 8.9.10.** Porcentaje de alícuotas que superan los criterios de aceptación (izq.) y porcentaje de alícuotas que no superan el test de reciclaje (dcha.), para las muestras del río Mero -MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), MPK7 (Bastiagueiro) y MPK8 (Vilaboa)- y las muestras del río Ulla - ABC1, ABC2 y ABC3 (Borreiros, Catoira) y la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira)- y empleando los métodos LBG y EBG. Las muestras ABC1\*\* y ABC4\*\* tienen un tamaño de alícuota de 10 granos.

### 8.1.6.3. Dosis equivalente y rango de edad para las muestras MPK1, MPK2, MPK3, MPK4, MPK5, MPK6, MPK7 y MPK8.

A continuación, se detallan de manera individualizada para cada una de las muestras, los aspectos más relevantes de la señal OSL para la estimación de la *De* así como el cálculo de un rango de edad fiable.

Para la muestra MPK1 (Bribes) se han analizado un total de 141 alícuotas (Tabla 25). Mediante el método de integración de la señal LBG interpola un 72.3% del cual se acepta un 69.6%. Esto supone, una estimación de la *De* a partir de 71 alícuotas. Mediante el método EBG, como se describe en la misma tabla, la estimación se realiza con 61 alícuotas.

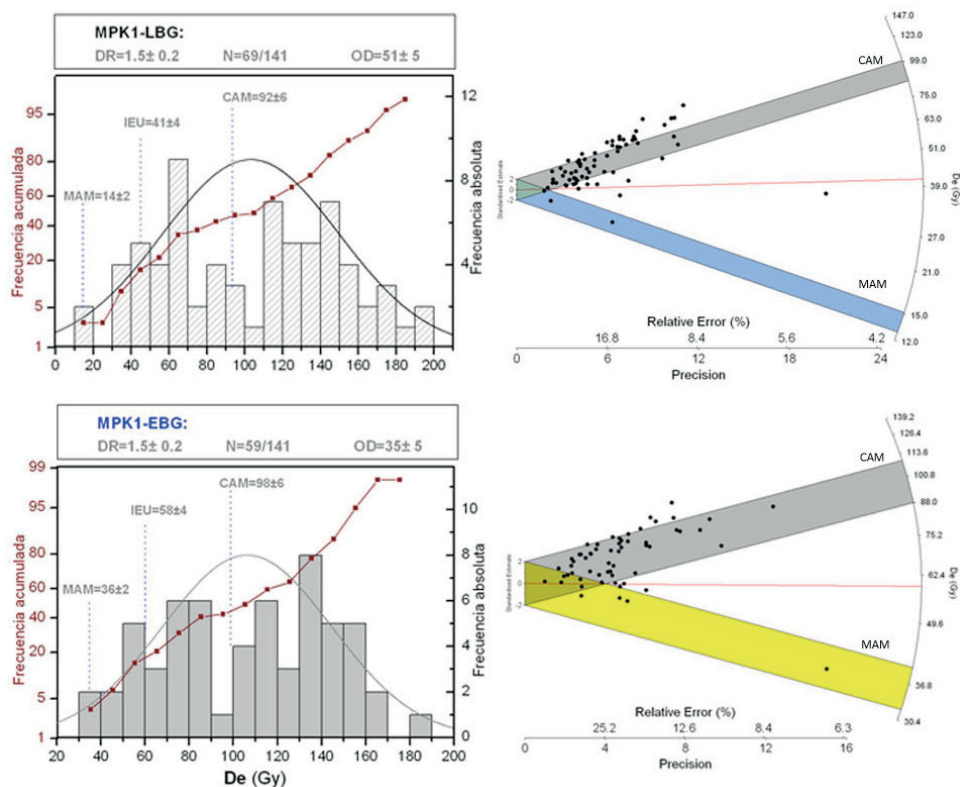
**Tabla 25.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK1 (Bribes), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK1 LBG	N	(%)	MPK1 EBG	N	(%)
Nº total de alícuotas	141	100	Nº total de alícuotas	141	100
Interpolan	102	72,3	Interpolan	102	72,3
Señal OSL Saturada (no interpola)	39	27,7	Señal OSL Saturada (no interpola)	35	24,8
Error curva OSL	0	0	Error curva OSL	4	2,8
Aceptadas	71	69,6	Aceptadas	61	59,8
Test Reciclaje Negativo	18	17,6	Test Reciclaje Negativo	13	12,7
Test Recuperación Negativo	2	2,0	Test Recuperación Negativo	2	2,0
Ajuste Exponencial+lineal	71	69,6	Ajuste Exponencial+lineal	61	59,8

Como se puede observar en el histograma de la figura (Fig. 8.10.1), los datos de la distribución obtenidos mediante el método LBG no parecen ajustarse a una distribución de tipo normal y la forma de línea de frecuencia acumulada no es claramente sigmoidea. En los test de normalidad, como ya se comentó, se rechaza la hipótesis de nula (normalidad) bajo nivel de significación del 5%. No obstante, en la misma figura, las características del histograma y de la línea de frecuencia acumulada para los datos obtenidos mediante el método EBG es muy similar y, sin embargo, en los test de normalidad se recomendaba no rechazar dicha hipótesis según la cual, los datos pertenecen a una única distribución de tipo normal.

Respecto al error relativo asociado, éste se sitúa entre valores de un 8% y un 20% para el método LBG, llegando hasta un 30% para el método EBG, como se puede observar en el eje X de los gráficos radiales representados en la misma figura. En estos gráficos también se puede observar la cantidad de alícuotas, representadas por cada uno de los puntos, que entran dentro del intervalo de confianza del 95% que

representa el ancho de cada una de las franjas, habiendo un mayor número de ellos en incluidos en la franja gris correspondiente al modelo CAM<sub>EBG</sub> (Fig. 8.10.1). Por otra parte, el número de alícuotas incluidas en el intervalo de confianza (i.c.) del 95% para el modelo MAM<sub>LBG</sub>, que presentan un error asociado inferior al 10% es de cero –incluyendo en este intervalo dos únicas alícuotas con errores superiores al 15%- mientras que, para el modelo MAM<sub>EBG</sub>, una única alícuota con un error relativo asociado menor de un 10% está incluida en dicho intervalo –también incluye otras alícuotas cuyo error supera el 20%- y cuya estimación daría lugar a edades de enterramiento inferiores a los 10ka.



**Figura 8.10.1.** Gráficos de distribución para la muestra MPK1 (Bribes), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya De es  $\geq 200$ Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la De (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la De (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la De (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

En la tabla (Tabla 22) se describían estimadores como al media aritmética -con su desviación típica- y la mediana, obteniéndose valores similares para ambos. Además, empleando el modelo  $CAM_{L BG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de  $92.34 \pm 6.61$ (Gy) con una  $OD_{L BG}$  del  $51 \pm 5\%$ , que supone un rango de edad de  $61.52 \pm 12,38$ (ka) (Tabla 26). Con el  $CAM_{E BG}$ , empleando 59 alícuotas, la estimación es de  $98.57 \pm 6.03$ (Gy) con una  $OD_{E BG}$  del  $35 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $65.67 \pm 12.99$ (ka). Mediante el modelo  $MAM_{L BG}$ , la  $De$  estimada es de  $14.23 \pm 2.30$ (Gy), cuyo rango de edad se estima en  $9.48 \pm 2.35$ (ka). Con el  $MAM_{E BG}$ , se obtienen estimaciones de  $36.82 \pm 2.65$ (Gy) y edades de  $24.53 \pm 4.94$ (ka). Con el  $IEU_{L BG}$  la  $De$  estimada es de  $41.13 \pm 4.39$ (Gy) con un rango de edad de  $27.54 \pm 5.94$ (ka) y mediante el modelo  $IEU_{E BG}$ , de  $58.99 \pm 4.90$ (Gy) y  $39.30 \pm 8.08$ (ka).

**Tabla 26.** Rango de edad para la muestra MPK1 (Bribes) estimado a partir de cada uno de los modelos de edad (CAM, MAM e IEU) y métodos de integración (L BG y E BG), excluyendo las alícuotas cuya estimación de la  $De$  es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

RANGO DE EDAD – MPK1 (Bribes)	L BG (N=69/141)	E BG (N=59/141)
CAM	$61.52 \pm 12,38$ (ka)	$65,67 \pm 12,99$ (ka)
MAM	$9.48 \pm 2.35$ (ka)	$24.53 \pm 4.94$ (ka)
IEU	$27.54 \pm 5.94$ (ka)	$39.30 \pm 8.08$ (ka)

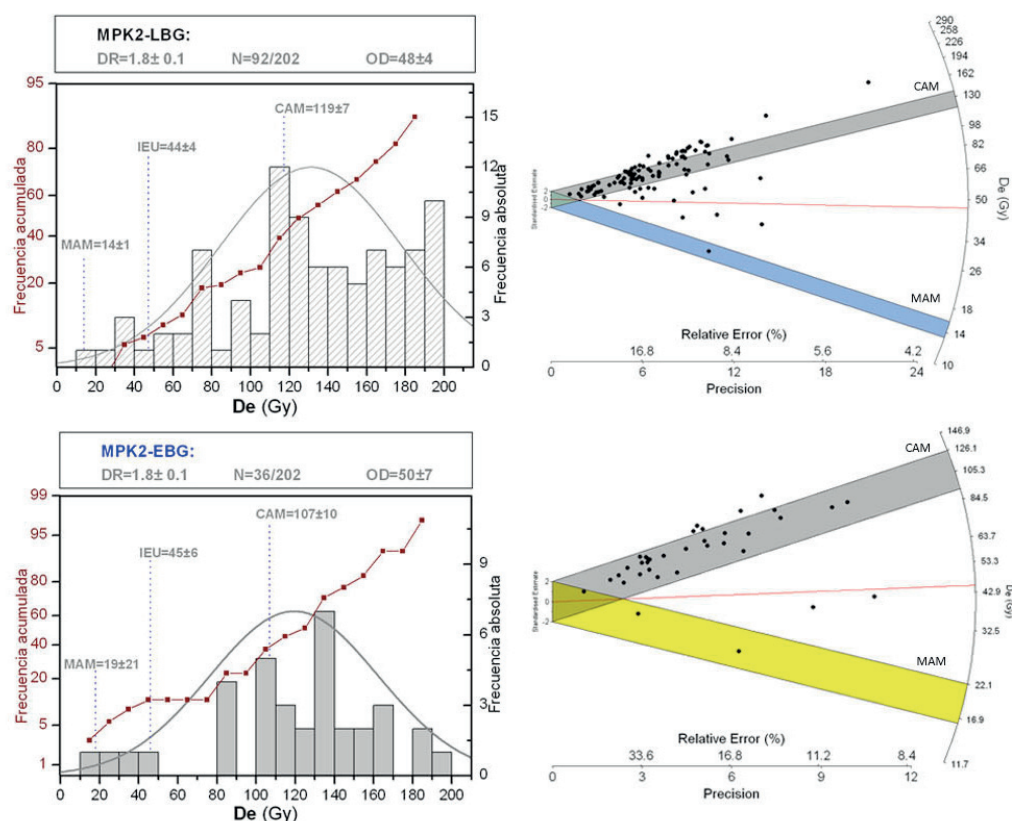
El número total de alícuotas analizado en la muestra MPK2 es de 202. Mediante el método L BG, interpola un 72.3% del cual, un 70.5% supera los criterios de aceptación, empleándose finalmente 103 alícuotas para la estimación de la  $De$ . Mediante el método E BG, esta estimación se realizará, únicamente con 37 alícuotas, presentando un 45% de alícuotas con error en el ajuste o en la forma de la curva de crecimiento OSL (Tabla 27).

**Tabla 27.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK2 (Sta. Cruz), empleando los métodos L BG y E BG.

MPK2 L BG	N	%	MPK2 E BG	N	%
Nº total de alícuotas	202	100	Nº total de alícuotas	202	100,0
Interpolan	146	72,3	Interpolan	83	41,1
Señal OSL Saturada (no interpola)	57	28,2	Señal OSL Saturada (no interpola)	27	13,4
Error curva OSL	0	0	Error curva OSL	91	45,0
Aceptadas	103	70,5	Aceptadas	37	44,6
Test Reciclaje Negativo	38	26,0	Test Reciclaje Negativo	59	71,1
Test Recuperación Negativo	4	2,7	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	103	70,5	Ajuste Exponencial+lineal	37	44,6



Para la muestra MPK2 (Sta. Cruz), el error relativo asociado se sitúa entre el 4 y el 20% para el método LBG, llegando hasta el 35% al emplear el método EBG como se puede observar en los gráficos radiales de la misma figura (Fig. 8.10.2). El modelo CAM presenta un elevado número de alícuotas dentro del i.c. del 95% con un error muy variable y estimaciones de la De entre 100 y 120Gy. El modelo MAM presenta, también, un número muy reducido de alícuotas dentro de su i.c. del 95% y cuyo error relativo es igual o superior al 10%. Para este modelo, la dosis estimada está entre 15 y 20Gy. El modelo IEU ofrece unas estimaciones intermedias.



**Figura 8.10.2.** Gráficos de distribución para la muestra MPK2 (Sta. Cruz) empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya De es  $\geq 200$ Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la De (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la De (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la De (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

La media aritmética, además de presentar valores similares a la mediana (Tabla 22), se solapa con la estimación de la  $De$  obtenida mediante el modelo  $CAM_{LBG}$ , de  $119.12 \pm 7.14$ (Gy), con una  $OD_{LBG}$  del  $48 \pm 8\%$  y un rango de edad de enterramiento de  $64.96 \pm 7.93$ (ka) (Tabla 28). Mediante el modelo  $CAM_{EBG}$ , la estimación obtenida con 36 alícuotas es de  $107.89 \pm 10.54$ (Gy) con una  $OD_{EBG}$   $50 \pm 7\%$ , y un rango de edad de  $58.83 \pm 8.50$ (ka). Por otra parte, mediante el modelo  $MAM_{LBG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de  $14.49 \pm 1.45$ (Gy) y un rango de edad  $7.90 \pm 1.45$ (ka). Con el  $MAM_{EBG}$  se obtienen estimaciones de  $19.08 \pm 21.26$ (Gy) y edades de  $10.40 \pm 11.64$ (ka). Con el  $IEU_{LBG}$ , la  $De$  estimada es de  $44.00 \pm 4.65$ (Gy), con un rango de edad de  $23.99 \pm 3.59$ (ka), y mediante el modelo  $IEU_{EBG}$ , de  $45.01 \pm 6.59$ (Gy) y  $24.54 \pm 4.44$ (ka).

**Tabla 28.** Rango de edad para la muestra MPK2 (Sta. Cruz) calculado a partir de los modelos de edad (CAM, MAM e IEU) y métodos de integración (LBG y EBG), excluyendo las alícuotas cuya estimación de la  $De$  es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

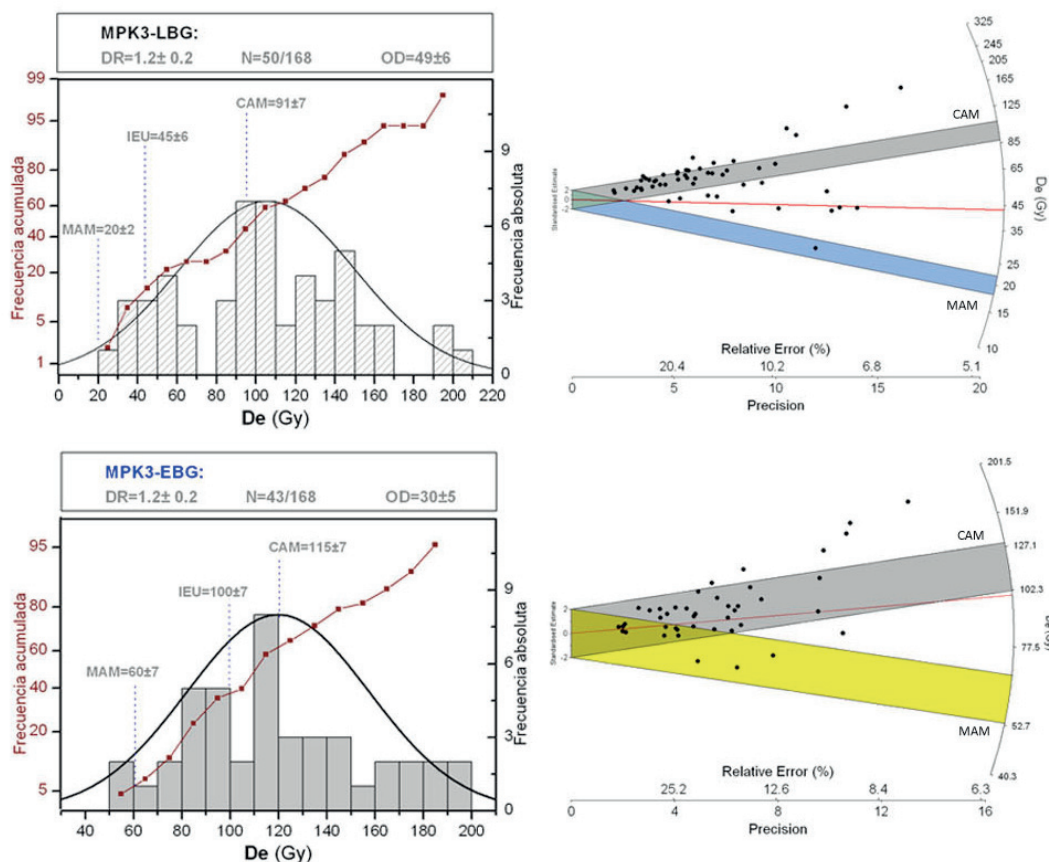
RANGO DE EDAD – MPK2 (Sta. Cruz)	LBG (N=92/202)	EBG (N=36/202)
CAM	$64.96 \pm 7.93$ (ka)	$58.83 \pm 8.50$ (ka)
MAM	$7.90 \pm 1.45$ (ka)	$10.40 \pm 11.64$ (ka)
IEU	$23.99 \pm 3.59$ (ka)	$24.54 \pm 4.44$ (ka)

Para la muestra MPK3 (Dorneda) se han analizado 168 alícuotas. Mediante el método LBG, interpola un 42.3% del cual, un 76,1% supera los criterios de aceptación, lo que supone un ajuste a partir de 54 alícuotas (Tabla 29). Los porcentajes obtenidos mediante el método EBG se describen en la misma tabla y el número final de alícuotas para estimar la  $De$  es de 44.

**Tabla 29.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK3 (Dorneda), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK3 LBG	N	%	MPK3 EBG	N	%
Nº total de alícuotas	168	100,0	Nº total de alícuotas	168	100,0
Interpolan	71	42,3	Interpolan	84	50,0
Señal OSL Saturada (no interpola)	96	57,1	Señal OSL Saturada (no interpola)	83	49,4
Error curva OSL	1	0,6	Error curva OSL	0	0,0
Aceptadas	54	76,1	Aceptadas	44	52,4
Test Reciclaje Negativo	18	25,4	Test Reciclaje Negativo	28	33,3
Test Recuperación Negativo	0	0,0	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	54	76,1	Ajuste Exponencial+lineal	44	52,4

El error relativo asociado para MPK3, tanto para LBG como para EBG, se ubica entre el 5 y el 30%, si bien, la mayoría de las alícuotas presentan valores superiores al 10% y están, además, integradas dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM, como se observa en los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.3). El modelo MAM<sub>LBG</sub> cuenta, únicamente, con una alícuota dentro de su i.c. del 95%, con un error entre el 7 y el 10% , y el modelo MAM<sub>EBG</sub> incluye tres alícuotas en este intervalo, cuyo error oscila entre el 12 y e 25%.



**Figura 8.10.3.** Gráficos de distribución para la muestra MPK3 (Dorneda), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  es  $\geq 200$  Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

El rango de edad para la muestra MPK3 (Dorneda) se describe en la tabla (Tabla 30). Así, la estimación de la  $De$  mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  es de  $91.14 \pm 7.19$  (Gy), con una  $OD_{LBG}$  del  $49 \pm 6\%$  y un rango de edad de  $75.15 \pm 16.12$  (ka). Mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  se obtiene una estimación de  $115.20 \pm 7.01$  (Gy), con una  $OD_{EBG}$  del  $30 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $94.99 \pm 19.81$  (ka). Empleando el modelo  $MAM_{LBG}$ , se obtiene una estimación de  $20.33 \pm 1.72$  (Gy) y un rango de edad de  $16.76 \pm 3.63$  (ka). Con el  $MAM_{EBG}$ , se obtienen estimaciones de  $60.71 \pm 7.05$  (Gy) y edades de  $50.06 \pm 11.55$  (ka). Con el  $IEU_{LBG}$  la  $De$  estimada es de  $41.53 \pm 3.94$  (Gy) con un rango de edad de  $34.24 \pm 7.56$  (ka) y mediante el modelo  $IEU_{EBG}$ , de  $100.80 \pm 7.16$  (Gy) y  $83.11 \pm 17.59$  (ka).

**Tabla 30.** Rango de edad para la muestra MPK3 (Dorneda) estimado a partir de cada uno de los modelos de edad (CAM, MAM e IEU) y métodos de integración (LBG y EBG), excluyendo las alícuotas cuya estimación de la  $De$  es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

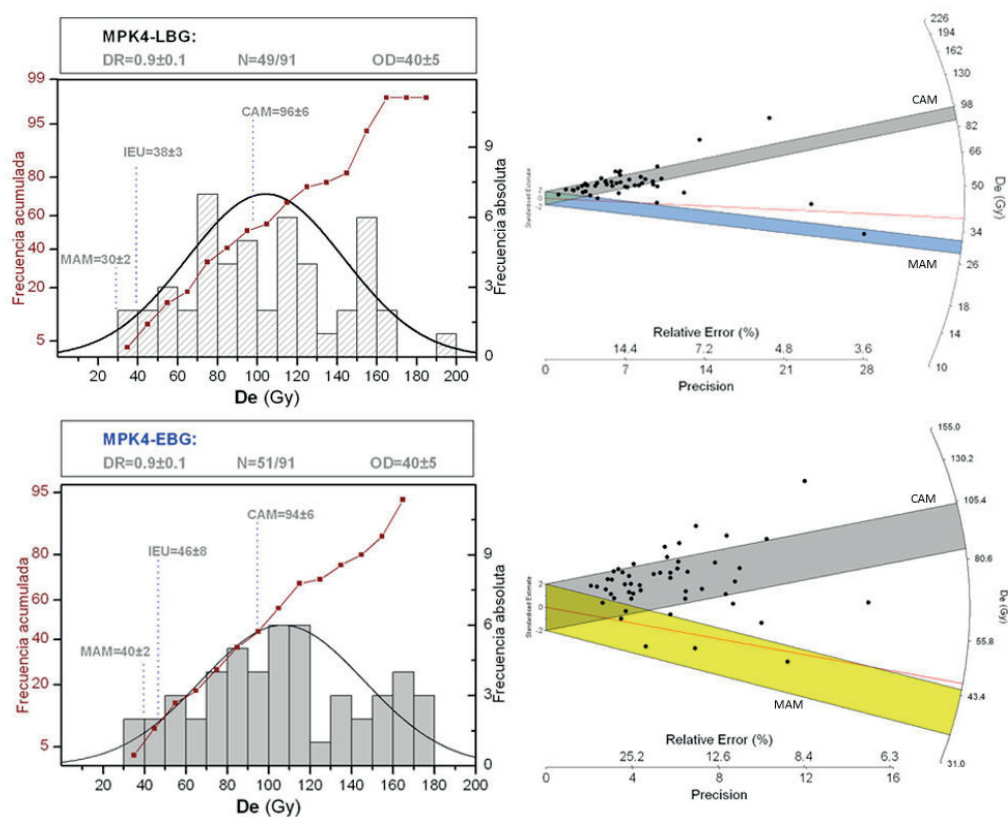
RANGO DE EDAD – MPK3 (Dorneda)	LBG (N=50/168)	EBG (N=43/168)
CAM	$75.15 \pm 16.12$ (ka)	$94.99 \pm 19.81$ (ka)
MAM	$16.76 \pm 3.63$ (ka)	$50.06 \pm 11.55$ (ka)
IEU	$34.24 \pm 7.56$ (ka)	$83.11 \pm 17.59$ (ka)

Para la muestra MPK4 (Mera) se han empleado 91 alícuotas. Mediante el método LBG interpola un 61.5% del cual, un 87.5% superan los criterios de aceptación, que significa un total de 49 alícuotas empleadas en el ajuste a la curva OSL (Tabla 31). Mediante el método EBG el número final de alícuotas empleadas en dicho ajuste, como se indica en la misma tabla, es de 51.

**Tabla 31.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK4 (Mera), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK4 LBG	N	%	MPK4 EBG	N	%
Nº total de alícuotas	91	100,0	Nº total de alícuotas	91	100,0
Interpolan	56	61,5	Interpolan	70	76,9
Señal OSL Saturada (no interpola)	31	34,1	Señal OSL Saturada (no interpola)	26	28,6
Error curva OSL	1	1,1	Error curva OSL	1	1,1
Aceptadas	49	87,5	Aceptadas	51	72,9
Test Reciclaje Negativo	5	8,9	Test Reciclaje Negativo	15	21,4
Test Recuperación Negativo	0	0,0	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	49	87,5	Ajuste Exponencial+lineal	51	72,9

Para la muestra MPK4 (Mera), el error estándar asociado presenta valores que oscilan entre el 3.5 y el 30% para LBG y entre el 6 y el 30% para EBG, como se puede observar en los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.4). En estos gráficos también se evidencia como la mayoría de alícuotas que están incluidas dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM presentan un error superior al 10%. Por otra parte, el modelo  $MAM_{LBG}$  cuenta con una única alícuota con un error asociado del 3.6%, que supone una estimación de 30Gy y edades próximas a los 35ka. El modelo  $MAM_{EBG}$ , cuenta con una alícuota cuyo error es de un 8% y otras tres alícuotas con un error relativo superior al 13%.



**Figura 8.10.4.** Gráficos de distribución para la muestra MPK4 (Mera), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  es  $\geq 200$ Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

El rango de edad estimado para MPK4 (Mera) se describe en la tabla (Tabla 32). Mediante el modelo  $CAM_{L BG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de  $96.64 \pm 6.30$  (Gy), con una  $OD_{L BG}$  del  $40 \pm 5\%$  y una edad estimada de  $103.33 \pm 23.23$  (ka). Mediante el modelo  $CAM_{E BG}$ , la dosis estimada es de  $97.42 \pm 6.35$  (Gy), con una  $OD_{E BG}$  del  $39 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $105.66 \pm 23.72$  (ka). Empleando el modelo  $MAM_{L BG}$  se obtienen valores de  $30.54 \pm 2.14$  (Gy) que supone una edad de  $34.07 \pm 7.68$  (ka) y mediante el  $MAM_{E BG}$  la  $De$  estimada es de  $40.44 \pm 2.43$  (Gy) con una edad de  $45.11 \pm 10.03$  (ka). Por último, mediante el modelo  $IEU_{L BG}$  se obtiene una  $De$  de  $38.96 \pm 2.93$  (Gy) y un rango de edad de  $43.45 \pm 9.86$  (ka) y empleando el modelo  $IEU_{E BG}$ , la  $De$  estimada es de  $46.88 \pm 3.16$  (Gy), que supone un rango de edad de  $52.28 \pm 11.74$  ka)

**Tabla 32.** Rango de edad para la muestra MPK4 (Mera) estimado a partir de los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

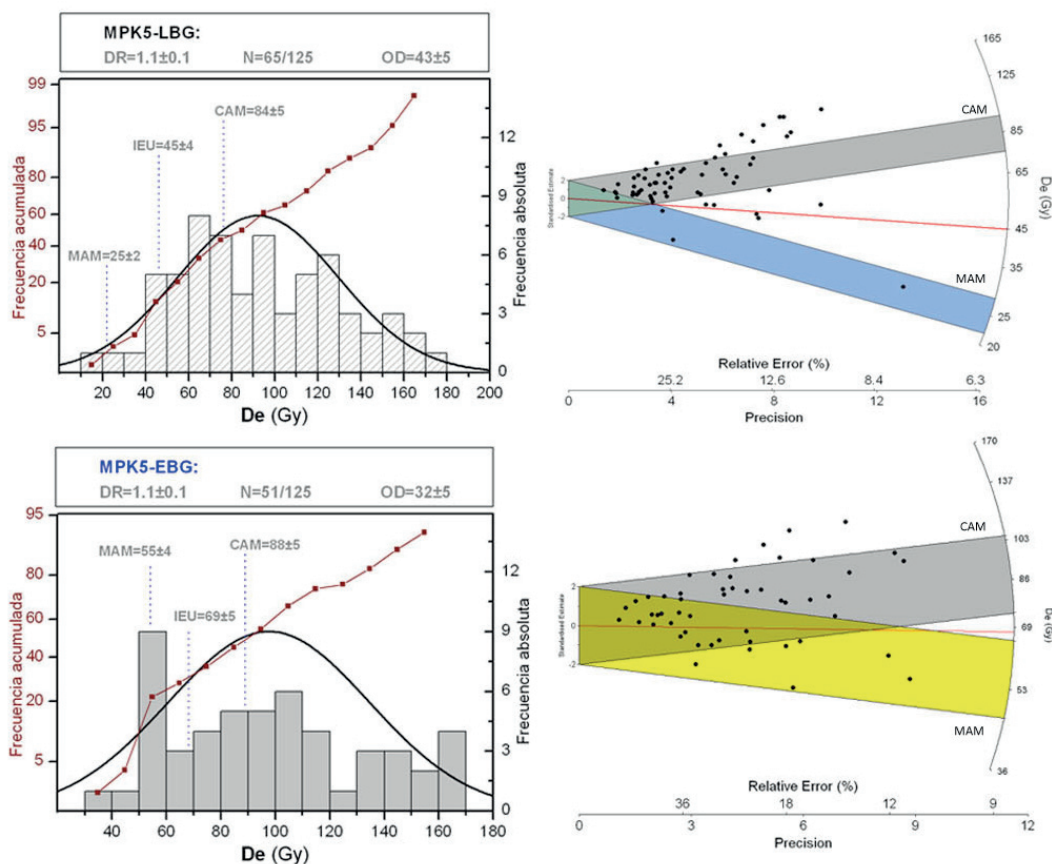
RANGO DE EDAD – MPK4 (Mera)	LBG (N=49/91)	EBG (N=51/91)
CAM	$103,33 \pm 23,23$ (ka)	$105,66 \pm 23,72$ (ka)
MAM	$34,07 \pm 7,68$ (ka)	$45,11 \pm 10,03$ (ka)
IEU	$43,45 \pm 9,86$ (ka)	$52,28 \pm 11,74$ (ka)

Para la muestra MPK5 (Mesón-Perillo) han sido analizadas 125 alícuotas. Mediante el método LBG, interpola un 80%, del cual superan los criterios de aceptación un 65%, empleándose 65 alícuotas para el ajuste y estimación de la  $De$  (Tabla 33). El número final de alícuotas empleadas en el ajuste a la curva OSL para el método EBG es de 51.

**Tabla 33.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK5 (Mesón-Perillo), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK5 LBG	N	%	MPK5 EBG	N	%
Nº total de alícuotas	125	100	Nº total de alícuotas	125	100,0
Interpolan	101	80,8	Interpolan	108	86,4
Señal OSL Saturada (no interpola)	23	18,4	Señal OSL Saturada (no interpola)	15	12,0
Error curva OSL	1	0,8	Error curva OSL	2	1,6
Aceptadas	66	65,3	Aceptadas	52	48,1
Test Reciclaje Negativo	35	34,7	Test Reciclaje Negativo	34	31,5
Test Recuperación Negativo	1	1,0	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	65	64,4	Ajuste Exponencial+lineal	51	48,1

El error relativo asociado para la mayoría de las alícuotas de la muestra MPK5 (Mesón-Perillo) se sitúa entre el 10 y el 40%, casi todas incluidas dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM, mientras que el modelo MAM<sub>LBG</sub>, incluye una alícuota con un error del 7% y otras dos con un error del 25%, dentro de su i.c. del 95%, como se puede observar en los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.5). No obstante, el modelo MAM<sub>EBG</sub> incluye un mayor número de alícuotas dentro del i.c. del 95%, con un error entre el 10% hasta valores por encima del 30%.



**Figura 8.10.5.** Gráficos de distribución para la muestra MPK5 (Mesón-Perillo), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $D_e$  es  $\geq 200$  Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $D_e$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $D_e$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $D_e$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

La estimación obtenida mediante el modelo  $CAM_{L BG}$  es de  $84.26 \pm 5.67$  (Gy), con una  $OD_{L BG}$  del  $43 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $73.06 \pm 10.99$  (ka) (Tabla 34). Utilizando el modelo  $CAM_{E BG}$ , la dosis estimada es de  $88.70 \pm 5.67$  (Gy), con una  $OD_{E BG}$  del  $32 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $76.91 \pm 11.46$  (ka). Con el modelo  $MAM_{L BG}$  la  $De$  estimada es de  $25.62 \pm 1.88$  (Gy), que supone un rango de edad de  $22.22 \pm 3.40$  (ka) y mediante el modelo  $MAM_{E BG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de  $55.43 \pm 4.13$  (Gy) con una edad de  $48.06 \pm 10.31$  (ka). Por último, mediante el modelo  $IEU_{L BG}$  se obtiene una estimación de la dosis de  $45.96 \pm 4.31$  (Gy) y  $39.85 \pm 6.54$  (ka), y con el modelo  $IEU_{E BG}$ , de  $68.85 \pm 5.63$  (Gy), estimación que supone un rango de edad de  $60.57 \pm 13.13$  (ka).

**Tabla 34.** Rango de edades para los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG, para la muestra MPK5 (Mesón-Perillo). (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

RANGO DE EDAD- MPK5 (Mesón-Perillo)	LBG (N=65/125)	EBG (N=51/125)
CAM	$73,06 \pm 10,99$ (ka)	$76.91 \pm 11.46$ (ka)
MAM	$22,22 \pm 3,40$ (ka)	$48.06 \pm 10.31$ (ka)
IEU	$39,85 \pm 6,54$ (ka)	$60.57 \pm 13.13$ (ka)

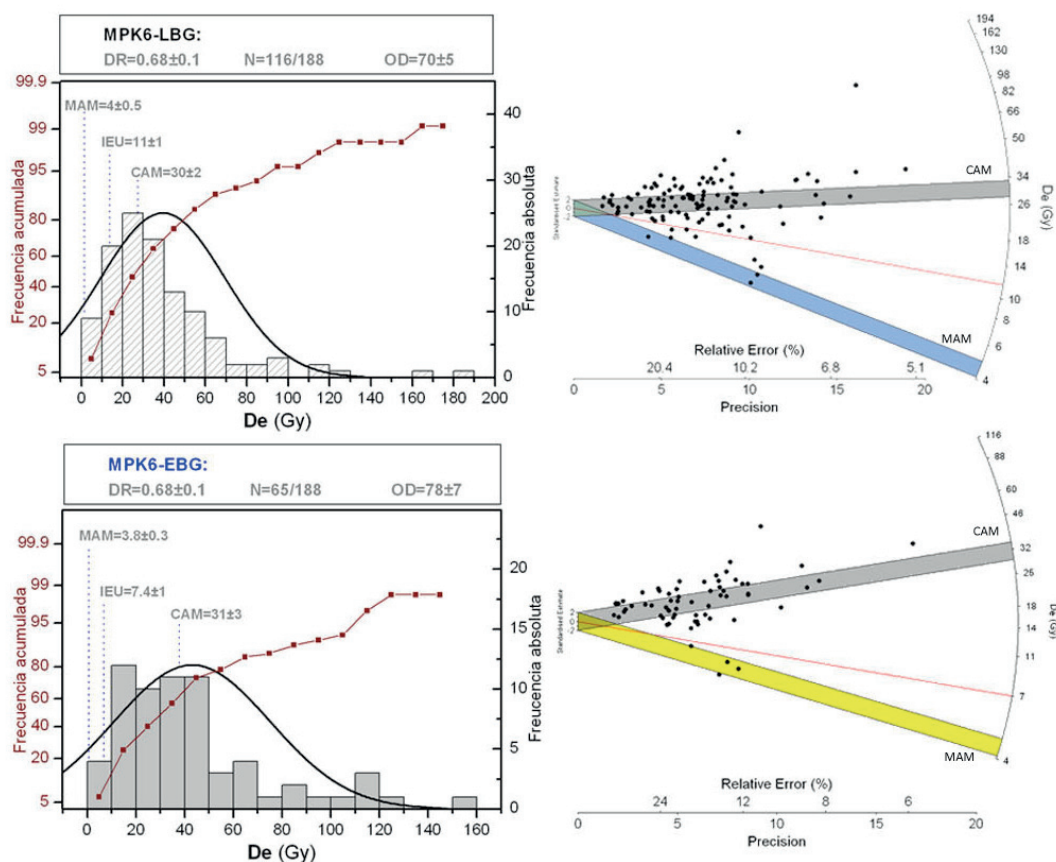
Para la muestra MPK6 (Cecebre) se han analizado 188 alícuotas e interpolan el 100%, independientemente del método de integración (Tabla 35). No obstante, para el método LBG supera un 64% los criterios de aceptación empleándose 116 alícuotas para el ajuste a la curva OSL mientras que, para el método EBG, se acepta un 35% lo cual supone un número de 65 alícuotas empleadas para la estimación de la  $De$ .

**Tabla 35.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK6 (Cecebre), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK6 LBG	N	%	MPK6 EBG	N	%
Nº total de alícuotas	188	100	Nº total de alícuotas	188	100,0
Interpolan	188	100	Interpolan	185	98,4
Señal OSL Saturada (no interpola)	0	0	Señal OSL Saturada (no interpola)	0	0,0
Error curva OSL	22	11,5	Error curva OSL	77	41.1
Aceptadas	121	64,4	Aceptadas	65	35,1
Test Reciclaje Negativo	47	25,0	Test Reciclaje Negativo	28	15,1
Test Recuperación Negativo	11	5,9	Test Recuperación Negativo	1	0,5
Ajuste Exponencial+lineal	116	61,7	Ajuste Exponencial+lineal	65	35,1



El error relativo para la muestra MPK6 (Cecebre) se sitúa entre el 5 y el 30%, como se puede observar en los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.6). También se observa una gran dispersión en torno a los valores incluidos dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM. Respecto al modelo MAM<sub>LBG</sub>, se incluyen, únicamente, dos alícuotas dentro de su i.c. del 95%, con un error del 10% y otras dos con un error del 20%, mientras que para el modelo MAM<sub>EBG</sub>, estas se reducen a tres alícuotas con un error por encima del 12%.



**Figura 8.10.6.** Gráficos de distribución para la muestra MPK6 (Cecebre), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya De es  $\geq 200$  Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la De (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la De (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la De (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

Mediante el modelo CAM<sub>LBG</sub> la estimación de la *De* es de  $30.52 \pm 2.20$ (Gy), con una *OD*<sub>LBG</sub> del  $70 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $44.57 \pm 11.68$ (ka) (Tabla 36). Mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub>, la dosis estimada es de  $31.61 \pm 3.28$ (Gy), con una *OD*<sub>EBG</sub> del  $78 \pm 7\%$  y un rango de edad de  $46.17 \pm 12.58$ (ka). Empleando el modelo MAM<sub>LBG</sub> se obtienen estimaciones de  $4.48 \pm 0.42$ (Gy) y edades de  $6.54 \pm 1.76$ (ka), y con el modelo MAM<sub>LBG</sub>, de  $3.85 \pm 0.34$ (Gy) y  $5.63 \pm 1.5$ (ka). Por último, mediante el modelo IEU<sub>LBG</sub> se obtiene una estimación de la *De* de  $11.44 \pm 1.12$ (Gy), con un rango de edad de  $16.71 \pm 4.52$ (ka), y con el modelo IEU<sub>EBG</sub>, la dosis estimada es de  $7.43 \pm 1.25$ (Gy) y el rango de edad calculado de  $10.86 \pm 3.29$ (ka).

**Tabla 36.** Rango de edades para la muestra MPK6 (Cecebre) estimada a partir de los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

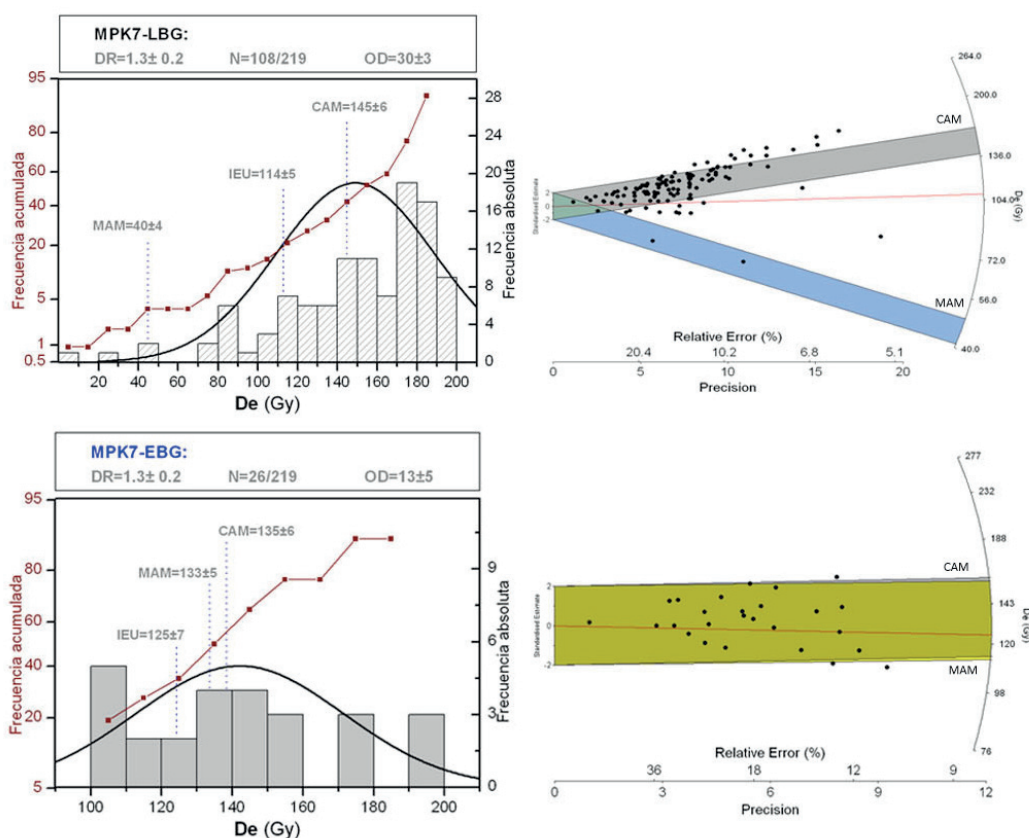
RANGO DE EDAD- MPK6 (Cecebre)	LBG (N=116/188)	EBG (N=65/188)
CAM	$44,57 \pm 11,68$ (ka)	$46,17 \pm 12,58$ (ka)
MAM	$6,54 \pm 1,76$ (ka)	$5,63 \pm 1,5$ (ka)
IEU	$16,71 \pm 4,52$ (ka)	$10,86 \pm 3,29$ (ka)

Para la muestra MPK7 (Bastigueiro) se han analizado en el lector de luminiscencia 219 alícuotas. Los datos descritos en la tabla (Tabla 37) muestran como, mediante el método LBG interpola un 68% del cual un 77.2% supera los criterios de aceptación, empleándose un total de 115 alícuotas para la estimación de la *De*. Mediante el método EBG, interpola un 26% del cual se acepta un 52%, lo cual supone un número final de 26 alícuotas empleadas en el ajuste a la curva OSL y estimación de la *De*.

**Tabla 37.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK7 (Bastigueiro), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK7 LBG	N	%	MPK7 EBG	N	%
Nº total de alícuotas	219	100	Nº total de alícuotas	219	100,0
Interpolan	149	68,0	Interpolan	59	26,9
Señal OSL Saturada (no interpola)	65	29,7	Señal OSL Saturada (no interpola)	34	15,5
Error curva OSL	5	2,3	Error curva OSL	133	60,7
Aceptadas	115	77,2	Aceptadas	31	52,5
Test Reciclaje Negativo	32	47,0	Test Reciclaje Negativo	6	10,2
Test Recuperación Negativo	1	1,5	Test Recuperación Negativo	1	1,7
Ajuste Exponencial+lineal	115	77,2	Ajuste Exponencial+lineal	31	52,5

Como se puede observar en los histogramas de la figura (Fig. 8.10.7) para la muestra MPK7 (Bastiagueiro), existen grandes diferencias entre los métodos de integración debido, probablemente, a la diferencia de alícuotas incluidas en las estimaciones. Para MPK7-LBG, se observa una distribución desviada hacia los valores más elevados y con cola hacia la izquierda. Este aspecto coincide con las pruebas de bondad de ajuste y el rechazo de la hipótesis según la cual la distribución sigue una normal, así como la asimetría negativa y el grado de apuntamiento calculado. No obstante, para MPK7-EBG se observa un buen ajuste a una normal y una línea de frecuencia acumulada cuasi sigmoidea, coincidiendo con los test de normalidad.



**Figura 8.10.7.** Gráficos de distribución para la muestra MPK7 (Bastiagueiro), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De \geq 200$  Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

Estas diferencias también afectan al error relativo asociado ya que, mediante el método LBG, este oscila entre el 5 y el 30%, y para el método EBG, es superior al 10%, como se observa en los gráficos radiales (Fig. 8.10.7). Para el modelo CAM, la mayoría de las alícuotas entran dentro del i.c.95% con la salvedad de que empleando el método LBG se obtiene una sobre-dispersión del 30% y empleando el EBG, un 13%. Respecto al modelo  $MAM_{LBG}$ , se incluyen dos alícuotas dentro del i.c. 95%, una con un error inferior al 10% y otra con un error cercano al 20%,. No obstante, mediante el  $MAM_{EBG}$ , el intervalo de confianza de éste modelo se solapa con el modelo  $CAM_{EBG}$ , e incluye prácticamente todas las alícuotas cuyo error relativo presenta valores por encima del 10% y una estimación de dosis en torno a los 133Gy.

Los rangos de edad obtenidos para MPK7 (Bastiagueiro) se describen en la tabla (Tabla 38). Así, mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de  $144.99 \pm 6.02$ (Gy) con una  $OD_{LBG}$  del  $30 \pm 3\%$  y un rango de edad de  $105.91 \pm 23.76$ (ka). Mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  la estimación obtenida es de  $135.43 \pm 6.85$ (Gy), con una  $OD_{EBG}$  del  $13 \pm 5\%$ , y un rango de edad de  $98.93 \pm 22.37$ (ka). Con el modelo  $MAM_{LBG}$  se obtiene una estimación de  $40.19 \pm 4.79$ (Gy) y un rango de edad de  $29.36 \pm 7.36$ (ka), y con el modelo  $MAM_{EBG}$ , se obtiene una estimación de  $133.10 \pm 5.31$ (Gy) y un rango de edad de  $97.23 \pm 21.78$ (ka). A partir del modelo  $IEU_{LBG}$  se obtiene una estimación de  $114.83 \pm 5.48$ (Gy) con un rango de edad de  $83.88 \pm 18.92$ (ka), y mediante el modelo  $IEU_{EBG}$ , la estimación es de  $125.47 \pm 7.25$ (Gy) y una edad de  $91.65 \pm 20.89$ (ka).

**Tabla 38.** Rango de edad para la muestra MPK7 (Bastiagueiro) estimado a partir de cada uno de los modelos estadísticos (CAM, MAM e IEU) y métodos de integración (LBG y EBG), excluyendo las alícuotas cuya estimación de la  $De$  es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

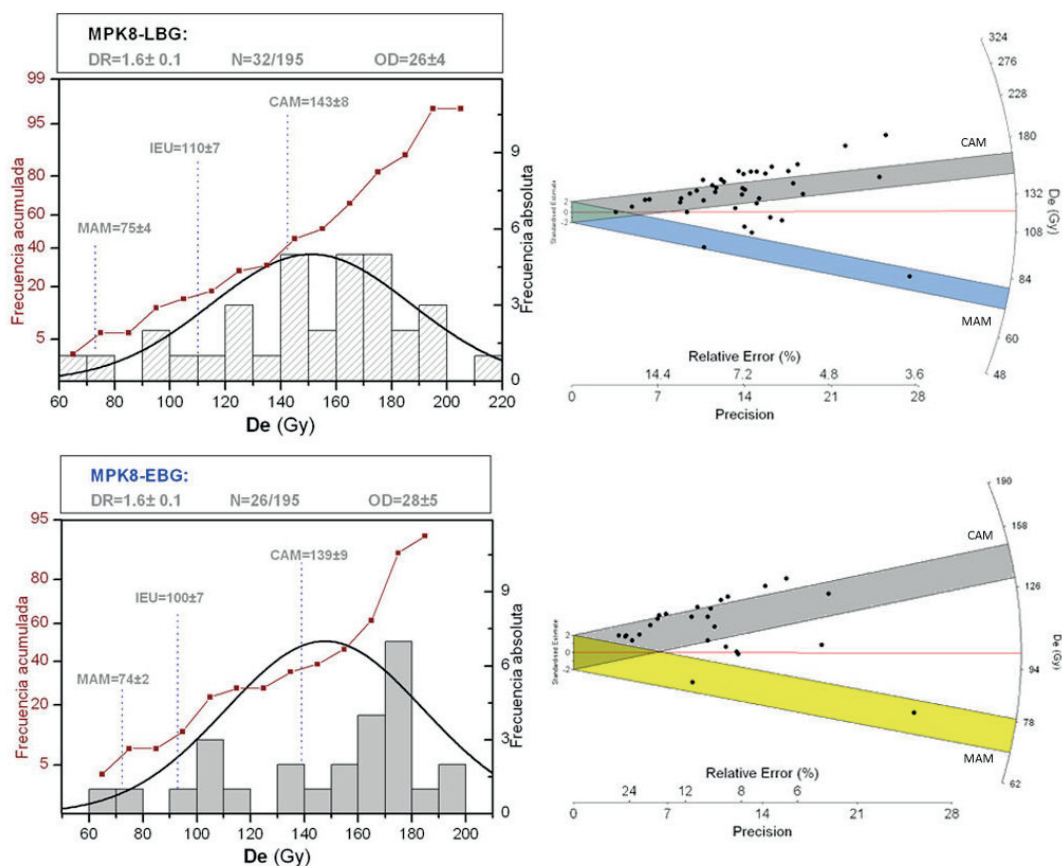
RANGO DE EDAD – MPK7 (Bastiagueiro)	LBG (N=108/219)	EBG (N=27/219)
CAM	$105.91 \pm 23.76$ (ka)	$98.93 \pm 22.37$ (ka)
MAM	$29.36 \pm 7.36$ (ka)	$97.23 \pm 21.78$ (ka)
IEU	$83.88 \pm 18.92$ (ka)	$91.65 \pm 20.89$ (ka)

La característica principal que presentan las 195 alícuotas analizadas de la muestra MPK8 (Vilaboa) es su alto porcentaje de saturación, superior al 75%, como se puede observar en la tabla (Tabla 39). Para LBG, interpola un 22.1% de alícuotas del cual un 95.3% supera los criterios de aceptación, y mediante el método EBG, interpola un 18% de alícuotas, de las que un 87% son aceptadas, lo que supone un número final de 32 y 26 alícuotas incluidas en el ajuste a la curva OSL, para cada uno de los métodos.

**Tabla 39.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra MPK8 (Vilaboa), empleando los métodos LBG y EBG.

MPK8 LBG	N	%	MPK8 EBG	N	%
Nº total de alícuotas	195	100	Nº total de alícuotas	195	100,0
Interpolan	43	22,1	Interpolan	35	17,9
Señal OSL Saturada (no interpola)	152	77,9	Señal OSL Saturada (no interpola)	148	75,9
Error curva OSL	0	0	Error curva OSL	11	5,6
Aceptadas	41	95,3	Aceptadas	30	85,7
Test Reciclaje Negativo	2	4,7	Test Reciclaje Negativo	4	11,4
Test Recuperación Negativo	0	0,0	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	41	95,3	Ajuste Exponencial+lineal	30	85,7

En los histogramas representados en la figura (Fig. 8.10.8), se pueden observar las diferencias entre el método LBG, más centrada y con una línea de frecuencia acumulada de forma sigmoidea, y el método EBG, con un mayor número de datos hacia los valores de dosis más elevados. Como ya se comentó, para MPK8-EBG, se rechaza la hipótesis nula de distribución normal a un nivel de significación del 5%, debido, probablemente, al reducido número de datos (N=26). Además, el grado de asimetría es muy reducido, por lo que la distribución se considera simétrica (ver Tabla 20 y Fig. 8.9.3). Otro aspecto relevante para la muestra MPK8 (Vilaboa) es que el error relativo asociado, como se puede observar en los gráficos radiales de la misma figura, se reduce en mayor medida para el método LBG, con valores entre el 3 y el 15%, llegando hasta un 24% para el método EBG. Por su parte, el modelo CAM incluye un mayor número de alícuotas incluidas dentro del i.c.95% mientras que el modelo MAM incluye, dos alícuotas dentro del i.c. 95%, con un error relativo del 3% y del 12%, respectivamente.



**Figura 8.10.8.** Gráficos de distribución para la muestra MPK8 (Vilaboa), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  es  $\geq 200\text{Gy}$ . En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

El rango de edad estimado para la muestra MPK8 por cada modelo de edad se describe en la tabla (Tabla 40). Así, mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de  $143.97 \pm 7.98\text{Gy}$  con una  $OD_{LBG}$  del  $26 \pm 4\%$  y un rango de edad de  $88.04 \pm 12.43\text{ka}$ . Mediante el modelo  $CAM_{EBG}$ , la estimación obtenida es de  $139.58 \pm 9.02\text{Gy}$  con una  $OD_{EBG}$  del  $28 \pm 5\%$  y un rango de edad de  $85.36 \pm 12.38\text{ka}$ . Mediante el modelo  $MAM_{LBG}$ , la estimación de  $De$  es de  $75.57 \pm 4.87\text{Gy}$  y el rango de edad obtenido de  $46.22 \pm 6.70\text{ka}$ . Con el  $MAM_{EBG}$ , se obtienen estimaciones de  $74.92 \pm 2.81\text{Gy}$  y edades de  $45.82 \pm 6.19\text{ka}$ . Con el  $IEU_{LBG}$  la  $De$

estimada es de  $110.83 \pm 7.80(\text{Gy})$  con un rango de edad de  $67.78 \pm 10.01(\text{ka})$ , y mediante el modelo  $\text{IEU}_{\text{EBG}}$ , de  $100.23 \pm 7.02(\text{Gy})$  y  $61.30 \pm 9.04(\text{ka})$ .

**Tabla 40.** Rango de edad para la muestra MPK8 (Vilaboa) estimado a partir de cada uno de los modelos de edad (CAM, MAM e IEU) y métodos de integración (LBG y EBG), excluyendo las alícuotas cuya estimación de la De es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

RANGO DE EDAD – MPK8 (Vilaboa)	LBG (N=32/195)	EBG (N=30/195)
CAM	88.04±12.43 (ka)	85.36±12.38 (ka)
MAM	46.22±6.70 (ka)	45.82±6.19 (ka)
IEU	67.78±10.01 (ka)	61.30±9.04 (ka)

8.1.6.4. Dosis equivalente, distribución y rango de edad para las muestras ABC1, ABC2, ABC3 y ABC4.

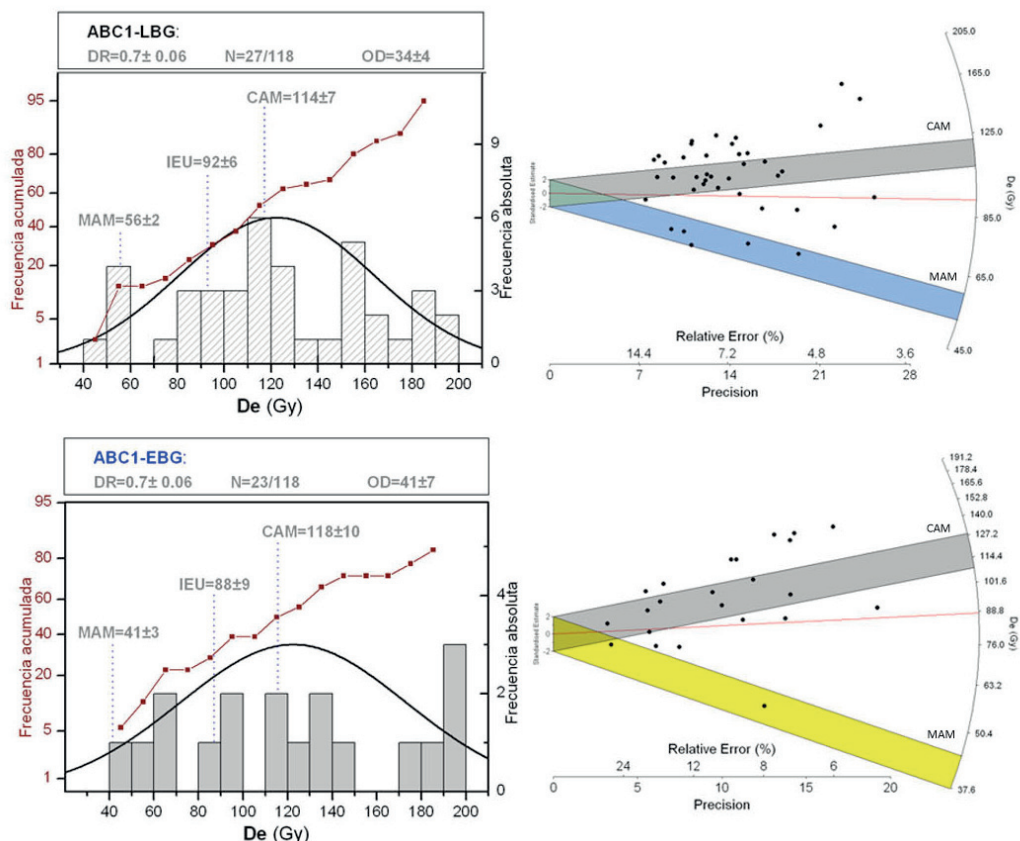
La estimación de la De para la muestra ABC1 (Borreiros) y con un tamaño de alícuota de aproximadamente 100 granos, se ha llevado a cabo empleando 118 alícuotas (Tabla 41). Mediante el método LBG interpola un 69% del cual, un 76% supera los criterios de aceptación, empleándose un número final de 27 alícuotas. Mediante el EBG, interpola un 62%, del cual superan los criterios de aceptación un 51% empleándose, finalmente, un total de 23 alícuotas para la estimación de la De.

**Tabla 41.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra ABC1(Borreiros) con tamaño de alícuota de 100 granos y empleando los métodos LBG y EBG.

ABC1 LBG (100granos)	N	(%)	ABC1 EBG (100granos)	N	(%)
Nº total de alícuotas	118	100	Nº total de alícuotas	118	100,0
Interpolan	82	69,49	Interpolan	74	62,7
Señal OSL Saturada (no interpola)	36	30,51	Señal OSL Saturada (no interpola)	40	33,9
Error curva OSL	0	0,00	Error curva OSL	5	4,2
Aceptadas	63	76,83	Aceptadas	38	51,4
Test Reciclaje Negativo	13	15,85	Test Reciclaje Negativo	27	36,5
Test Recuperación Negativo	2	2,44	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	63	76,83	Ajuste Exponencial+lineal	38	51,4

En los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.9), se puede observar, para LBG, un error relativo entre el 3 y el 14% para el método LBG, y entre el 5 y el 25% para el método EBG. Así, mientras que hay un mayor número de alícuotas con un error por debajo del 10% que entran dentro del i.c. del 95% estimado con el modelo  $\text{CAM}_{\text{LBG}}$ , cinco de las ocho alícuotas incluidas dentro de este intervalo para el modelo  $\text{CAM}_{\text{EBG}}$  presentan un error por

debajo del 10%. Respecto al modelo MAM, el número de alícuotas dentro de dicho intervalo para el modelo  $MAM_{LBG}$  es de cinco y con un error entre el 5 y el 10%, mientras que para el método  $MAM_{EBG}$  es de dos, si bien, una de ellas presenta un error superior al 24%.



**Figura 8.10.9.** Gráficos de distribución para la muestra ABC1 (Borreiros) con 100granos/alícuota, empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De \geq 200$ Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y-izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

El rango de edad estimado par la muestra ABC1 (Borreiros), con un tamaño de alícuota de 100, se describe en la tabla (Tabla 42). Mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  la estimación de la  $De$  es de  $114.58 \pm 7.36$ (Gy) con una  $OD_{LBG}$  del  $37 \pm 4\%$ , y un rango de edad de  $165.56 \pm 42.19$  (ka). A partir del modelo  $CAM_{EBG}$  la estimación de la  $De$  es de  $118.05 \pm 10.99$ (Gy), con una  $OD_{EBG}$  del  $41 \pm 7\%$ , y un rango de edad de  $170.58 \pm 44.96$  (ka). Con el modelo



MAM<sub>LBG</sub>, estas estimaciones son de 56.64±2.38(Gy) con un rango de edad de 81.84±20.45 (ka), y con el MAM<sub>EBG</sub>, de 41.53±3.62(Gy) con un rango de edad de 60.01±15.69 (ka). Mediante el modelo IEU<sub>LBG</sub> la estimación de la *De* es de 92.47±6.29(Gy) y un rango de edad de 133.61±34.18 (ka), y con el modelo IEU<sub>EBG</sub> , la estimación de la *De* es de 88.55±2.90(Gy), con un rango de edad de 127.95±42.14 (ka).

**Tabla 42.** Rango de edad para la muestra ABC1 (Borreiros) con un tamaño de alícuota de 100 granos, estimada con los modelos CAM, MAM e IEU para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG, excluyendo las alícuotas cuya estimación de la *De* es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

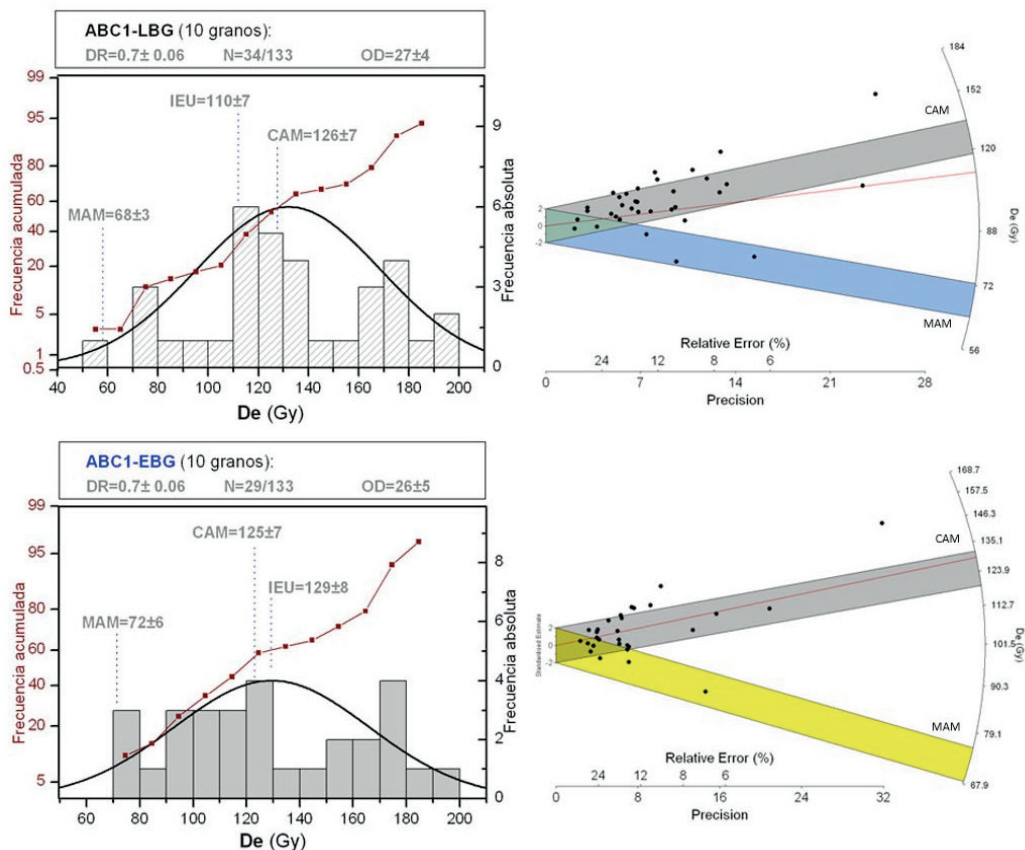
RANGO DE EDAD- ABC1 (100 granos) (Borreiros)	LBG (N=27/118)	EBG (N=23/118)
CAM	165.56±42.19 (ka)	170.58±44.96(ka)
MAM	81.84±20.45 (ka)	60.01±15.69(ka)
IEU	133.61±34.18 (ka)	127.95±42.14 (ka)

Por su parte, el número de alícuotas analizadas para la muestra ABC1 (Borreiros) con un tamaño de 10 granos es de 133 alícuotas (Tabla 43). Mediante el método LBG, interpola un 73% del cual un 56%supera los criterios de aceptación empleándose, finalmente, un número de 34 alícuotas para la estimación de la *De*. Mediante el método EBG, interpola un 65% del cual se acepta un 48% lo que resulta en un número final de alícuotas de 29, para ajuste a la curva OSL y estimación de la *De*.

**Tabla 43.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra ABC1 (Borreiros) con tamaño de alícuota de 10 granos y empleando los métodos LBG y EBG.

ABC1 LBG (10granos)	N	(%)	ABC1 EBG (10granos)	N	(%)
Nº total de alícuotas	133	100	Nº total de alícuotas	133	100
Interpolan	97	72,93	Interpolan	87	65,40
Señal OSL Saturada (no interpola)	36	27,07	Señal OSL Saturada (no interpola)	30	22,60
Error curva OSL	18	13,53	Error curva OSL	16	12,00
Aceptadas	55	56,70	Aceptadas	42	48,30
Test Reciclaje Negativo	24	24,74	Test Reciclaje Negativo	29	33,3
Test Recuperación Negativo	1	1,03	Test Recuperación Negativo	1	1,10
Ajuste Exponencial+lineal	31	31,96	Ajuste Exponencial+lineal	28	32,20

El rango de error relativo asociado se sitúa entre un 3 y un 25% para LBG y entre un 3 y un 20% para EBG (Fig. 8.10.10). Además, el número de alícuotas incluidas dentro del i.c. 95% con un error inferior al 10% para el modelo CAM<sub>LBG</sub> es de seis, y para el CAM<sub>EBG</sub> de tres. Por su parte, el modelo MAM, tanto para el método LBG como el método EBG, incluye un mínimo de tres alícuotas dentro del i.c. del 95% con un error relativos entre el 6 y el 15%.



**Figura 8.10.10.** Gráficos de distribución para la muestra ABC1 (Borreiros) (10granos/alícuota), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  es  $\geq 200\text{Gy}$ . En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y-izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

El rango de edad estimado para ABC1 (Borreiros) con un tamaño de alícuota de 10 granos, para cada uno de los modelos de edad seleccionados, se describe en la tabla (Tabla 44). Mediante el modelo CAM<sub>LBG</sub> la estimación de la *De* es de 129.76±7.44(Gy) con una *OD*<sub>LBG</sub> del 27±4%, y un rango de edad de 183.21±46.44 (ka). Mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> la estimación de la *De* es de 125.12±7.83(Gy), con una *OD*<sub>EBG</sub> del 26±5%, y un rango de edad de 180.79±46.01 (ka). Mediante el modelo MAM<sub>LBG</sub>, estas estimaciones son de 68.51±3.93(Gy) con un rango de edad de 98.99±20.06 (ka), y con el MAM<sub>EBG</sub>, de 64.88±16.27(Gy) con un rango de edad de 104.62±26.98 (ka). Mediante el modelo IEU<sub>LBG</sub> la estimación de la *De* es de 110.47±7.14(Gy) y un rango de edad de 159.63±40.69 (ka), y mediante el modelo IEU<sub>EBG</sub> , la estimación de la *De* es de 129.77±8.20(Gy), con un rango de edad de 187.52±47.74 (ka).

**Tabla 44.** Rango de edad para la muestra ABC1 (Borreiros) con un tamaño de alícuota de 10 granos, estimada con los modelos CAM, MAM e IEU para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG, excluyendo las alícuotas cuya estimación de la *De* es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

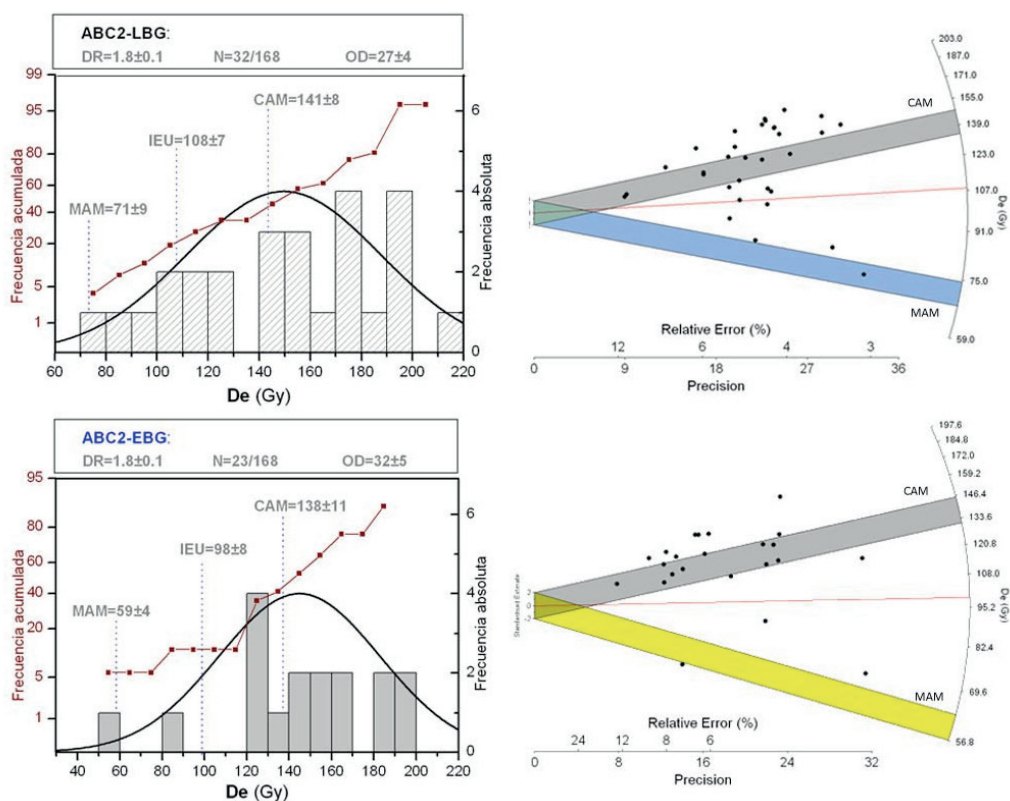
RANGO DE EDAD- ABC1 (10granos) (Borreiros, Catoira)	LBG (N=34/133)	EBG (N=29/133)
CAM	183.21±46.44 (ka)	180.79±46.01 (ka)
MAM	98.99±20.06 (ka)	104.62±26.98 (ka)
IEU	159.63±40.69 (ka)	187.52±47.74 (ka)

Para la muestra ABC2 (Borreiros) se han analizado un total de 168 alícuotas (Tabla 45). Mediante el método LBG interpola un 42% del cual, un 98% supera los criterios de aceptación, contando con 32 alícuotas para la estimación final de la *De*. Por su parte, mediante el método EBG, del 44% de alícuotas que interpolan, solo un 31% es aceptado, contando con un número final de 23 alícuotas.

**Tabla 45.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra ABC2 (Borreiros) con tamaño de alícuota de 100 granos y empleando los métodos LBG y EBG.

ABC2 LBG	N	(%)	ABC2 EBG	N	(%)
Nº total de alícuotas	168	100.0	Nº total de alícuotas	168	100.0
Interpolan	71	42.2	Interpolan	75	44.6
Señal OSL Saturada (no interpola)	97	57.8	Señal OSL Saturada (no interpola)	81	48.2
Error curva OSL	0	0.0	Error curva OSL	22	13.1
Aceptadas	70	98.6	Aceptadas	53	31.5
Test Reciclaje Negativo	1	1.4	Test Reciclaje Negativo	5	3.0
Test Recuperación Negativo	0	0,0	Test Recuperación Negativo	0	0.0
Ajuste Exponencial+lineal	70	98.6	Ajuste Exponencial+lineal	53	70.7

En los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.11) se puede observar como el porcentaje de error relativo estándar se ubica entre el 3 y el 13%, tanto para el método LBG como para el EBG. Además, el número de alícuotas que entran dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM es muy reducido, tanto para el método LBG como para el EBG (franja gris de la misma figura). No obstante, a pesar de la amplia dispersión observada (en histogramas y gráficos radiales), los porcentajes de sobre-dispersión son del 27% y del 32%, para LBG y EBG, respectivamente. Respecto al modelo  $MAM_{LBG}$  el número de alícuotas dentro del i.c. del 95% es de dos, con error relativo inferior al 5%. El modelo  $MAM_{EBG}$ , cuenta con una única alícuota y un error que menor al 10%.



**Figura 8.10.11.** Gráficos de distribución para la muestra ABC2 (Borreiros) (100granos/alícuota), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  es  $\geq 200Gy$ . En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y-izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

En la tabla (Tabla 46) se describe el rango de edad obtenido para la muestra ABC2 (Borreiros) y para cada modelo de edad seleccionado. Mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  se obtiene una estimación de la  $De$  de

141.46±7.82(Gy), con una  $OD_{\text{LBG}}$  del 27±4% y un rango de edad de 72.78±13.52(ka). Mediante el modelo  $\text{CAM}_{\text{EBG}}$ , la estimación de la  $De$  es de 138.37±10.10(Gy) con una  $OD_{\text{EBG}}$  del 32±5% y un rango de edad de 71.19±13.68(ka). Mediante el modelo  $\text{MAM}_{\text{LBG}}$  se obtiene una estimación de 71.96±2.82(Gy) y un rango de edad de 37.02±6.74(ka). Con el  $\text{MAM}_{\text{EBG}}$  se obtiene una paleodosis de 59.93±4.04(Gy) y una edad de 30.83±5.86(ka). Por último, mediante el modelo  $\text{IEU}_{\text{LBG}}$ , la  $De$  estimada es de 108.93±7.85(Gy), con un rango de edad de 56.04±10.75 (ka), y mediante el modelo  $\text{IEU}_{\text{EBG}}$ , se obtiene una estimación de la  $De$  de 98.99±8.57(Gy) y un rango de edad de enterramiento de 50.93±10.07 (ka).

**Tabla 46.** Rango de edad para la muestra ABC2 (Borreiros) con un tamaño de alícuota de 100 granos, estimada con los modelos CAM, MAM e IEU para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG, excluyendo las alícuotas cuya estimación de la  $De$  es superior a 200Gy. (N) denota el número de alícuotas empleado en el cálculo del total analizadas.

RANGO DE EDAD- ABC2 (Borreiros, Catoira)	LBG (N=32/168)	EBG (N=23/168)
CAM	78.78±13.55 (ka)	71.19±13.68 (ka)
MAM	37.02±6.74 (ka)	30.83±5.86 (ka)
IEU	56.04±10.75 (ka)	50.93±10.07 (ka)

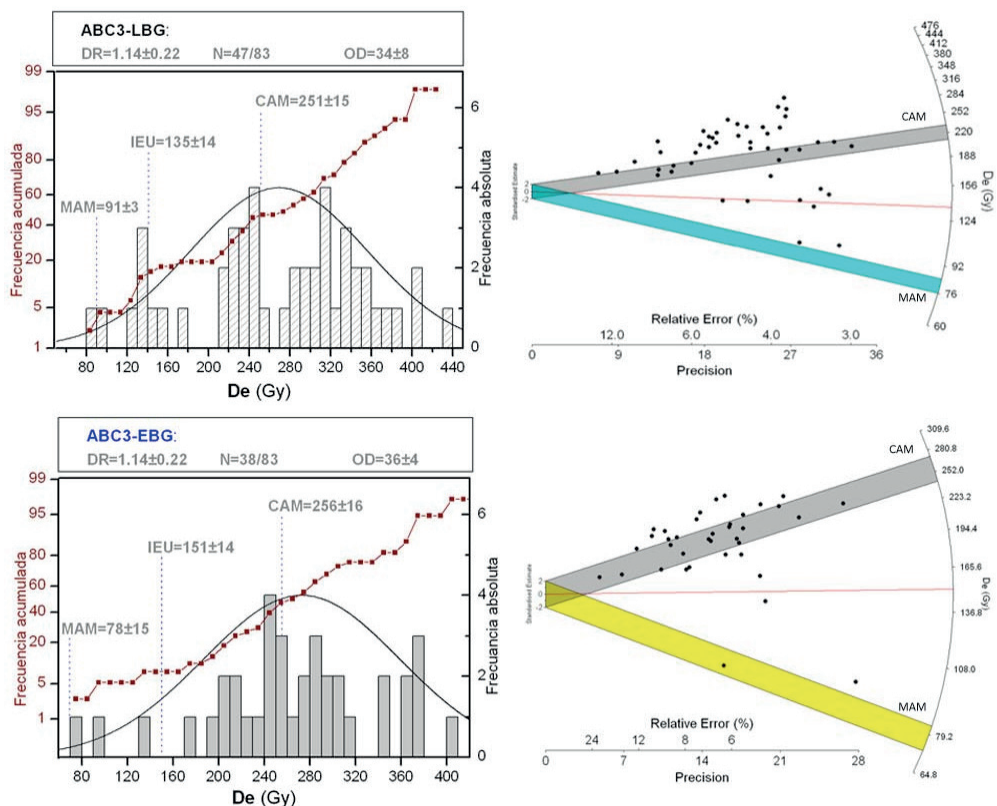
Para la muestra ABC3 (Borreiros) se han analizado un total de 83 alícuotas de aproximadamente, con un tamaño aproximado de cien granos (Tabla 47). Mediante el método LBG interpola un 64% del cual se acepta un 88% y que supone un número final de alícuotas de 47. Mediante el método EBG, interpola un 80%, del cual se acepta un 56% empleándose, finalmente un total de 38 alícuotas para la estimación de la  $De$ .

**Tabla 47.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra ABC3 (Borreiros) con tamaño de alícuota de 100 granos y empleando los métodos LBG y EBG.

ABC3 LBG	N	(%)	ABC3 EBG	N	(%)
Nº total de alícuotas	83	100,0	Nº total de alícuotas	83	100,0
Interpolan	53	63,9	Interpolan	67	80,7
Señal OSL Saturada (no interpola)	30	36,1	Señal OSL Saturada (no interpola)	15	18,1
Error curva OSL	0	0,0	Error curva OSL	0	0,0
Aceptadas	47	88,7	Aceptadas	38	56,7
Test Reciclaje Negativo	6	11,3	Test Reciclaje Negativo	26	31,3
Test Recuperación Negativo	0	0,0	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	47	88,7	Ajuste Exponencial+lineal	38	56,7

En los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.12), el error relativo asociado para la muestra ABC3 (Borreiros) oscila entre el 3 y el 15%, si bien, se están incluyendo estimaciones situadas en la zona de saturación (>200Gy).

Es por ello por lo que únicamente se acepta la estimación obtenida mediante el modelo MAM, si bien, para el MAM<sub>EBG</sub> solamente se observa una única alícuota con un error inferior al 7%.



**Figura 8.10.12.** Gráficos de distribución para la muestra ABC3 (Borreiros) (100granos/alícuota), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) sin excluir aquellas alícuotas cuya De es  $\geq 200$  Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la De (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la De (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la De (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y-izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

La estimación de la edad de enterramiento para ABC3 (Borreiros) se describe en la tabla (Tabla 48). Para esta muestra no se han excluido aquellas alícuotas cuya estimación se ubica en la zona lineal de saturación de la curva de crecimiento, debido al número insuficiente de éstas para obtener una estimación estadísticamente significativa. Es por ello por lo que el modelo MAM resulta el único fiable para esta muestra. Así, mediante el CAM<sub>LBG</sub> la De estimada es de  $251.93 \pm 15.45$  (Gy) con una  $OD_{LBG}$  del  $38 \pm 4\%$  y un rango de edad de

234.98±47.94(ka). Mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> se obtiene una *De* de 256±16.67(Gy), una *OD*<sub>EBG</sub> del 36±4(%) y un rango de edad de 239.06±49.05(ka). Mediante el modelo MAM<sub>LBG</sub> la *De* es de 91.85±3.55(Gy) con un rango de edad de 85.67±16.99(ka) y para el modelo MAM<sub>EBG</sub> la dosis estimada es de 78.18±15.59(Gy), obteniéndose una edad de 72.92±20.31(ka). Por último, mediante el modelo IEU<sub>LBG</sub> se obtienen *De* de 135.10±14.98(Gy) con un rango de edad de 126.01±28.22 (ka) y mediante el modelo IEU<sub>EBG</sub> , de 151.94±14.32(Gy) con una edad de 141.71±30.64(ka).

**Tabla 48.** Rango de edades para la muestra ABC3 (Borreiros) estimado a partir de los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración. También se incluye el número de alícuotas que interpolan del total analizado (N).

RANGO DE EDAD- ABC3 (Borreiros, Catoira)	LBG (N=47/83)	EBG (N=38/83)
CAM	234,98±47,94 (ka)	239,06±49,05 (ka)
MAM	85,67±16,99 (ka)	72,92±20,31 (ka)
IEU	126,01±28,22 (ka)	141,71±30,64 (ka)

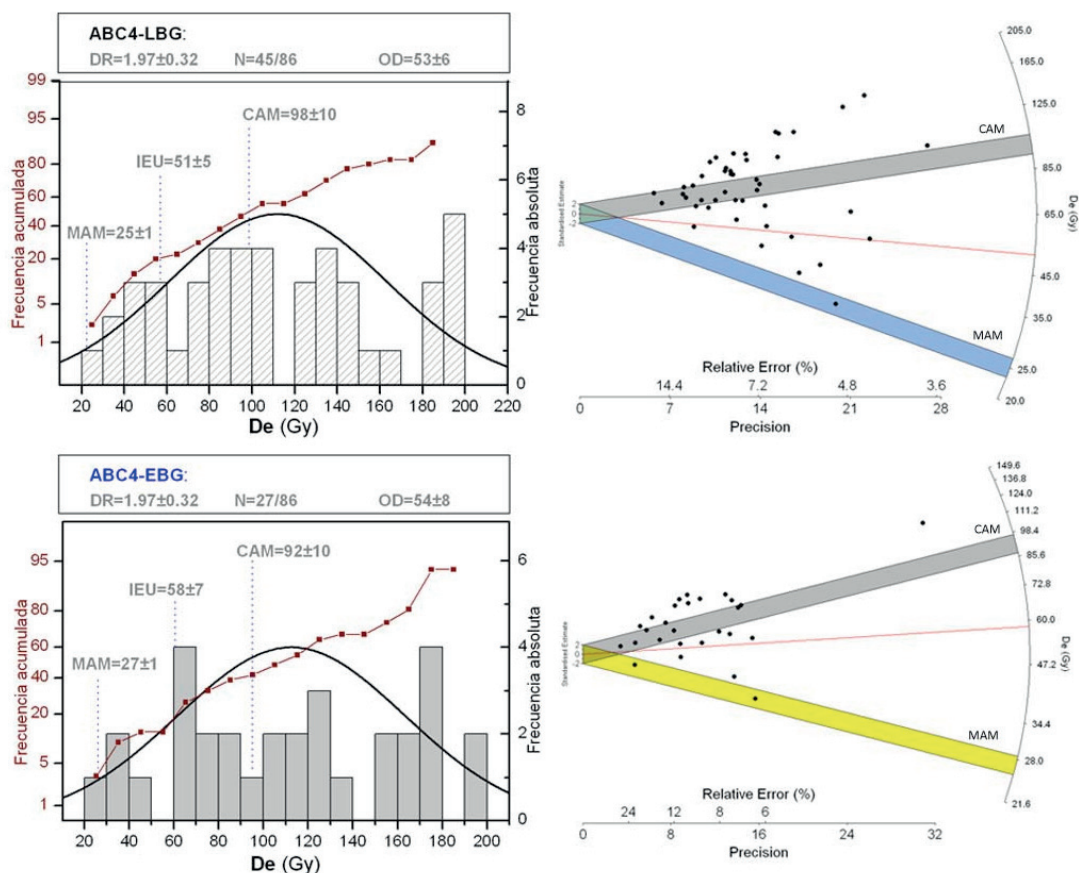
Para la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira) y con un tamaño de alícuota de 100 granos, se han empleado 89 alícuotas (Tabla 49). Mediante el método LBG interpola un 83% del cual un 74% es aceptado, presentando un número total de 45 alícuotas para la estimación de la *De*. Mediante el EBG, interpola un 93% del cual se acepta un 47%, lo que supone un total de 27 alícuotas para ajuste a curva OSL y estimación de la *De*.

**Tabla 49.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra ABC4 (Santa Eulalia) con tamaño de alícuota de 100 granos y empleando los métodos LBG y EBG.

ABC4 LBG	N	(%)	ABC4 EBG	N	(%)
Nº total de alícuotas	89	100,0	Nº total de alícuotas	86	100,0
Interpolan	74	83,1	Interpolan	80	93,0
Señal OSL Saturada (no interpola)	12	13,5	Señal OSL Saturada (no interpola)	5	5,8
Error curva OSL	0	0,0	Error curva OSL	1	1,2
Aceptadas	55	74,3	Aceptadas	38	47,5
Test Reciclaje Negativo	12	16,2	Test Reciclaje Negativo	36	45,0
Test Recuperación Negativo	2	2,7	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	55	74,3	Ajuste Exponencial+lineal	38	47,5



En los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.13), se observa un error relativo asociado que oscila entre el 5 y el 15%, si bien, algunos valores presentan un menor error y, por tanto, mayor precisión. El número de alícuotas incluido dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM es bastante reducido y con un error entre el 7 y el 14%. Para el modelo MAM<sub>LBG</sub> solamente está incluida en este intervalo una única alícuota cuyo error es del 5% y para el MAM<sub>EBG</sub> se incluyen dos alícuotas con un error del 6 y del 14%.



**Figura 8.10.13.** Gráficos de distribución para la muestra ABC4 (Santa Eulalia) (100granos/alícuota), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya  $De$  es  $\geq 200$ Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.



El rango de edad estimado para la muestra ABC4 (Santa Eulalia) con cada uno de los modelos de edad seleccionados se describe en la siguiente tabla (Tabla 50). Mediante el modelo CAM<sub>LBG</sub>, se obtienen estimaciones de *De* de 98.47±8.25(Gy) con una sobre-dispersión del 53±6% y un rango de edad de 54.67±10.67 (ka). Con el modelo CAM<sub>EBG</sub>, se obtiene una estimación de 98.47±8.25(Gy) con una sobre-dispersión del 53±6% y un rango de edad de 51.33±10.63 (ka). A partir del modelo MAM<sub>LBG</sub> se obtienen valores de 24.34±1.50(Gy) y un rango de edad de 13.99±2.60 (ka) y mediante el modelo MAM<sub>EBG</sub> la *De* estimada es de 27.12±1.67(Gy), lo que supone un rango de edad de 14.98±2.80(ka). Por último, mediante el modelo IEU<sub>LBG</sub>, la estimación de la dosis es de 51.46±5.50(Gy), con un rango de edad de 28.42±5.86 (ka), y con el modelo IEU<sub>EBG</sub>, la *De* estimada es de 58.73±7.89(Gy), con un rango de edad de 32.43±7.19(ka).

**Tabla 50.** Rango de edad para la muestra ABC4 (Santa Eulalia), con un tamaño de alícuota de 100 granos, estimado con los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG, con el número de alícuotas que interpolan del total analizadas (N)

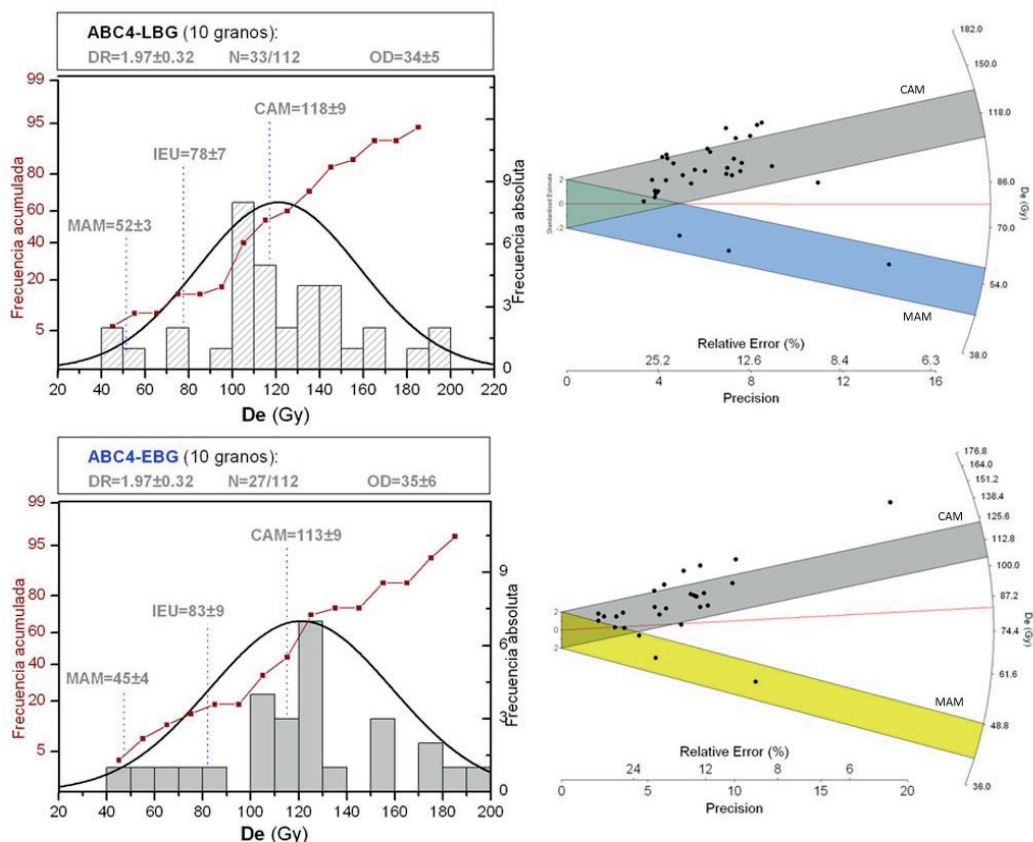
RANGO DE EDAD- ABC4 (100 granos) (Santa Eulalia)	LBG (N=45/86)	EBG (N=27/86)
CAM	54.67±10.67 (ka)	51.33±10.63(ka)
MAM	13.99±2.60 (ka)	14.98±2.80(ka)
IEU	28.42±5.86 (ka)	32.43±7.19 (ka)

El número de alícuotas analizado para la muestra ABC4 (Santa Eulalia) y con un tamaño de diez granos, es de 112. Mediante el método LBG, interpola un 84% del cual se acepta un 45.3%, presentando un número final de alícuotas de 33. Para el EBG, interpola un 78% del cual se acepta un 34%, empleándose 27 alícuotas para la estimación de la *De* (Tabla 51).

**Tabla 51.** Número total de alícuotas analizadas (N) y porcentaje (%) de ellas que interpolan, que presentan una señal OSL saturada y con error en la curva de crecimiento OSL, que son aceptadas y que no superan los criterios de aceptación (test de reciclaje y recuperación negativos) y que presentan un buen ajuste de tipo exponencial+lineal en la curva de crecimiento OSL, para la muestra ABC4 (Santa Eulalia) con tamaño de alícuota de 10 granos y empleando los métodos LBG y EBG.

ABC4 LBG - 10 GRANOS	N	(%)	ABC1 EBG - 10 GRANOS	N	(%)
Nº total de alícuotas	112	100,0	Nº total de alícuotas	112	100,0
Interpolan	95	84,8	Interpolan	88	78,6
Señal OSL Saturada (no interpola)	17	15,2	Señal OSL Saturada (no interpola)	17	15,2
Error curva OSL	0	0,0	Error curva OSL	7	6,3
Aceptadas	43	45,3	Aceptadas	30	34,1
Test Reciclaje Negativo	31	32,6	Test Reciclaje Negativo	31	35,2
Test Recuperación Negativo	1	1,1	Test Recuperación Negativo	0	0,0
Ajuste Exponencial+lineal	43	45,3	Ajuste Exponencial+lineal	30	34,1

En los gráficos radiales de la figura (Fig. 8.10.14) se observa, para la muestra ABC4 (Santa Eulalia), con un tamaño de alícuota de 10 granos, un error relativo cuyo rango se sitúa entre el 5 y el 25%, independientemente del método de integración empleado. No obstante, la alícuota que menor error presenta está incluida dentro del i.c. del 95% para el modelo  $MAM_{LBG}$  –junto con otras dos alícuotas cuyo error es del 15 y el 20% respectivamente- y que también está incluida dentro de este intervalo para el modelo  $MAM_{EBG}$ .



**Figura 8.10.14.** Gráficos de distribución para la muestra ABC4 (Santa Eulalia) (10granos/alícuota), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo) y excluyendo aquellas alícuotas cuya De es  $\geq 200$  Gy. En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la De (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la De (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la De (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y-izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante IEU.

El rango de edad estimado para la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira) con cada modelo seleccionado se describe en la tabla (Tabla 52). Mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> se obtiene una estimación de la *De* de 113.37±9.25(Gy) con una *OD*<sub>EBG</sub> del 35±6% y una edad de 62.62±24.89 (ka). Empleando el modelo MAM<sub>LBG</sub> se obtiene una *De* de 52.15±3.65(Gy) y un rango de edad de 22.85±4.49 (ka), y mediante el modelo MAM<sub>EBG</sub> , valores de 45.06±4.04(Gy) y 24.89±4.92 (ka). A partir del modelo IEU<sub>LBG</sub> , la *De* estimada es de 78.20±7.22(Gy) y el rango de edad de 44.22±9.21 (ka), y empelando el modelo IEU<sub>EBG</sub> , la *De* es de 83.34±9.30(Gy) y el rango de edad de 46.03±9.61 (ka).

Tabla 52. Rango de edad para la muestra ABC4 (Santa Eulalia), con un tamaño de alícuota de 10 granos, estimada para los modelos CAM, MAM e IEU, para cada uno de los métodos de integración LBG y EBG, excluyendo las alícuotas cuya estimación de la *De* es ≥200Gy.

RANGO DE EDAD- ABC4 (10granos) (Santa Eulalia, Catoira)	LBG (N=33/112)	EBG (N=27/112)
CAM	62.62±12.24 (ka)	62.62±24.89 (ka)
MAM	22.85±4.49 (ka)	24.89±4.92 (ka)
IEU	44.22±9.21 (ka)	46.03±9.61 (ka)

8.1.6.5. Rango de edad estimado por cada modelo (CAM, MAM e IEU).

Considerando el método EBG como aquel que extrae la componente rápida de la señal OSL de manera más eficiente, el rango de edad obtenido los distintos modelos de edad empleados se resumen en las tablas (Tabla 53 y Tabla 54).

**Tabla 53.** Rango de edad para los depósitos fluviales de la cuenca del río Mero (MPK) a partir de los modelos CAM, MAM e IEU y mediante el método EBG. En la tabla se indica la localización de cada muestra, la cota absoluta (cota A) en metros (snma) y la cota relativa (cota R), también en metros respecto al nivel que presenta el curso fluvial actual correspondiente a cada depósito. También se indica el porcentaje de sobre-dispersión estimado mediante en método EBG (OD-EBG).

Muestras Cuenca Mero	cota A (m)	cota R (m)	%OD <sub>EBG</sub>	Edad CAM <sub>EBG</sub>	Edad MAM <sub>EBG</sub>	Edad IEU <sub>EBG</sub>
Bribes (MPK1)	50	28	35±5	65.67±12.99	24.53±4.94	39.30±8.08
Santa Cruz (MPK2)	14	14	50±7	58.83±8.5	10.4±11.64	24.54±4.44
Dorneda (MPK3)	56	47	30±5	94.99±19.81	50.06±11.55	83.11±17.59
Mera (MPK4)	6	6	39±5	105.66±23.72	45.11±10.03	52.28±11.74
Mesón-Perillo (MPK5)	50	8	32±5	76.91±11.46	48.06±10.31	60.57±13.13
Cecebre (MPK6)	50	30	78±7	46.17±12.58	5.63±1.5	10.86±3.29
Bastiaqueiro(MPK7)	41	36	13±5	98.93±22.37	97.23±21.78	91.65±20.89
Vilaboa (MPK8)	40	10	28±5	85.36±12.38	45.82±6.19	61.30±9.04

En la tabla anterior se describe el rango de edad estimado a partir de los modelos de edad  $CAM_{EBG}$ ,  $MAM_{EBG}$  e  $IEU_{EBG}$ , incluyendo la sobre-dispersión estimada ( $OD_{EBG}$ ) para los depósitos fluviales desarrollados en la cuenca del río Mero y la península de Sada (muestras MPK) (Tabla 53), presentando unos resultados muy dispares. Si se tiene en cuenta la cota absoluta de cada uno de los depósitos, de mayor a menor, la muestra MPK3 (Dorneda), situada a 56m (snma) y a 47m de su curso fluvial correspondiente, en este caso el Rego da Loba, presenta una edad  $CAM_{EBG}$  de  $94\pm19ka$ , una edad mínima  $MAM_{EBG}$  de  $50\pm10ka$  y una edad  $IEU_{EBG}$  de  $83.11\pm17.59ka$ , más próxima al modelo de edad central. La muestra MPK1 (Bribes), situada a 50m (snma) y a 28m respecto al río Brexa, presenta una edad  $CAM_{EBG}$  de  $65\pm12ka$ , una edad mínima  $MAM_{EBG}$  de  $24\pm5ka$  y una edad  $IEU_{EBG}$  de  $39.30\pm8.08ka$ . La muestra MPK6 (Cecebre), con una  $OD_{EBG}$  superior al 70%, situada a 50m (snma) y a 30m sobre el río Mero, presenta una edad  $CAM_{EBG}$  de  $46\pm12ka$ , una edad mínima  $MAM_{EBG}$  de  $5\pm1ka$  y una edad  $IEU_{EBG}$  de  $10.86\pm3.29ka$ . La muestra MPK7 (Bastiagueiro), con una  $OD_{EBG}$  del 13%, se sitúa a 41m (smna) y a 36m respecto al Rego de Bastiagueiro, ofrece edades  $CAM_{EBG}$ ,  $MAM_{EBG}$  e  $IEU_{EBG}$  muy similares, de  $98\pm22$ ,  $97\pm21ka$  y  $91.65\pm20.89ka$ , respectivamente. La muestra MPK5 (Mesón-Perillo) se sitúa a 50m (snma) y a 8m del Rego de San Pedro, con una edad  $CAM_{EBG}$  de  $76\pm11ka$ , una edad mínima  $MAM_{EBG}$  de  $48\pm10ka$  y una edad  $IEU_{EBG}$  intermedia de  $60.57\pm13.13ka$ . La muestra MPK8 (Vilaboa), se sitúa a 39m (snma) y a 10m del Río Trabe, con una edad  $CAM_{EBG}$  de  $85\pm12ka$  y una edad mínima de  $45\pm6ka$ . La muestra MPK2 (Sta.Cruz), se sitúa en una cota absoluta de 14m (snma) y de la desembocadura del Rego da Loba, con una edad  $CAM_{EBG}$  de  $58\pm5ka$ , una edad mínima  $MAM_{EBG}$  de  $10\pm11ka$  y una edad  $IEU_{EBG}$  de  $24.54\pm4.44ka$ . Por último, la muestra MPK4 (Mera), se sitúa 6m de la desembocadura del Río Douro, en Mera, altura que coincide con su cota absoluta, y con un rango de edad  $CAM_{EBG}$  superior al resto, de  $105\pm23ka$ , una edad mínima  $MAM_{EBG}$  de  $45\pm10ka$  y una edad  $IEU_{EBG}$  de  $52.28\pm11.74ka$ .

Respecto a las muestras ABC, la relación entre el rango de edad  $CAM_{EBG}$  obtenido respecto a la cota absoluta guarda una mayor coherencia si bien, el modelo de edad mínima  $MAM_{EBG}$  presenta una mayor disparidad de resultados (Tabla 54).

**Tabla 54.** Rango de edad para los depósitos fluviales desarrollados en Catoira (río Ulla) estimado a partir de los modelos de edad CAM, MAM e IEU, empleando el método EBG. En la tabla se indica la localización de cada muestra, la cota absoluta (cota A) en metros (snma) que coincide con la cota relativa a su cauce. También se indica el porcentaje de sobre-dispersión estimado mediante en método EBG (OD-EBG). (10gr.): Tamaño de alícuota de 10 granos.

Muestras Catoira (río Ulla)	cota A (m)	OD <sub>EBG</sub>	Edad CAM <sub>EBG</sub>	Edad MAM <sub>EBG</sub>	Edad IEU <sub>EBG</sub>
Borreiros (ABC1)	40	41±7	170.58±44.96	60.01±15.69	127.95±42.14
Borreiros (ABC1) (10gr.)	''	26±5	180.79±46.01	104.62±26.98	187.52±47.74
Borreiros (ABC2)	40	32±5	71.19±13.68	30.83±5.86	50.93±10.07
Borreiros (ABC3)	40	36±4	239.06±49.05	72.92±20.31	141.71±30.64
Santa Eulalia (ABC4)	30	54±8	51.53±10.63	14.98±2.8	32.43±7.19
Santa Eulalia (ABC4) (10gr.)	''	35±6	62.62±24.89	24.89±4.92	46.03±9.61

La muestra ABC1 (Borreiros), situada a 40m (snma) presenta, con un tamaño de alícuota de 100 granos, una estimación de la edad mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> de 170±45ka y una OD<sub>EBG</sub> del 41%. La edad estimada con el modelo MAM<sub>EBG</sub> es de 60±15ka y con el modelo IEU<sub>EBG</sub> de 127.95±42.14ka. Para el tamaño de alícuota de 10 granos (cuya OD<sub>EBG</sub> es del 26%), la estimación CAM<sub>EBG</sub> es de 180±46ka, la edad mínima MAM<sub>EBG</sub> de 104±26ka, y una edad IEU<sub>EBG</sub> de 187.52±47.74ka. Para ABC2 (Borreiros), situada también a 40m (snma) pero en un nivel superior del depósito, la edad CAM<sub>EBG</sub> es de 71±13ka, la edad mínima MAM<sub>EBG</sub> de 30±6ka y una edad IEU<sub>EBG</sub> intermedia de 50.93±10.07ka. Para la muestra ABC3 (Borreiros), también a 40m (snma) y a situada a un nivel todavía mayor (que ABC1 y ABC2) dentro del depósito, la estimación de la edad mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> incluye un gran número de alícuotas cuya estimación se ubica en la zona de saturación perdiendo fiabilidad. No obstante, la edad mínima MAM<sub>EBG</sub> es de 72±20ka.

Por último, para la muestra ABC4 (Santa Eulalia, Catoira), situada a 30m (snma) se obtiene, para un tamaño de alícuota de 100 granos (cuya OD<sub>EBG</sub> es del 54%), una estimación de la edad a partir del modelo CAM<sub>EBG</sub> de 51±10ka, una edad de 14±2ka con el modelo MAM<sub>EBG</sub> y una edad intermedia de 32.43±7.19ka con el modelo IEU<sub>EBG</sub>. Para un tamaño de alícuota de 10granos (cuya OD<sub>EBG</sub> es del 35%), la edad estimada con el modelo CAM<sub>EBG</sub> es de 62±24ka, una edad de 24±4ka con el modelo MAM<sub>EBG</sub> y una edad intermedia de 46.03±9.61ka con el modelo IEU<sub>EBG</sub>.

## 8.1.7. Señal pIR-IRSL para algunas muestras MPK a partir de grano grueso y fracción fina.

La señal IRSL o su variante a alta temperatura pIR-IRSL se ha obtenido aplicando un estímulo infrarrojo sobre los minerales de feldespato -en este caso, feldespato potásico (FdK)- contenido en la fracción gruesa (90-250 $\mu$ m) o en la fracción fina (<63 $\mu$ m) (ver apartado 7.6.8.) de algunas de las muestras del río Mero (MPK).

Para las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre) la proporción de feldespatos extraída de la fracción gruesa es inferior al 7% y para las muestras MPK7 y MPK8 está en torno al 25% para. Además, la proporción de feldespato potásico purificado (con HF10%) de la de feldespato inicial, no supera el 2% para la mayoría de las muestras, a excepción de MPK 7, con un 16%, y de MPK8 (Vilaboa), con un 47% (Tabla 55).

Por su parte, la fracción fina extraída de las muestras MPK1 (Bribes), MPK2 (Sta.Cruz), MPK3 (Dorneda), MPK4 (Mera), MPK5 (Mesón-Perillo) y MPK6 (Cecebre), se sub-divide en tres fracciones: 0-4 $\mu$ m, 4-11 $\mu$ m y 11-63 $\mu$ m (ver apartado 7.3.2.3.), como se describe en la tabla (Tabla 56). Así, la fracción limosa 4-11 $\mu$ m, para la cual se asume un mayor contenido en feldespato, presenta unas proporciones entre el 1% el 6%, mientras que para la fracción 11-63 $\mu$ m, también limosa, pero con un menor contenido hipotético en feldespato, las proporciones varían entre el 30% y el 70%. No obstante, independientemente de las proporciones de feldespato, muy escasas para estas muestras del río Mero (MPK), la señal pIR-IRSL obtenida de la mayoría de las alícuotas está saturada y no interpola, por lo que no se pueden obtener estimaciones mediante esta técnica de datación.

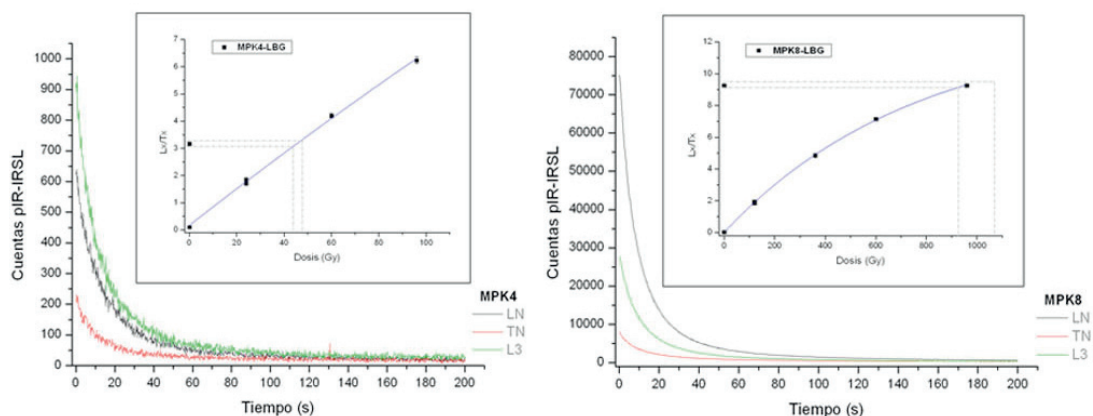
**Tabla 55.** Cantidad de cuarzo, feldespato y minerales pesados extraídas de la fracción 180-250 $\mu$ m: Peso inicial de la fracción 180-250 $\mu$ m (P.inicial), masa (en gramos) de granos de cuarzo sin tratar (P.Qz) y tratados con HF al 20% (P.Qz-HF20%), masa y porcentaje de feldespato (P.Fd y % Fd) y masa de minerales pesados (P.MP). También se incluye el peso inicial de feldespato potásico (P.inicial FdK) extraída de la fracción feldespatos, incluyendo la masa y porcentaje de feldespato potásico después de su tratamiento con fluorhídrico (P.FdK (HF 10%) y %FdK (HF 10%).

Muestra	P. Inicial	P. Qz	P. Qz (HF 20%)	P. Fd	% Fd	P. M.P.	P inicial Fdk	P. FdK (HF 10%)	% FdK (HF 10%)
MPK 1 (Bribes)	6,25	3,7	1,84	0,18	2,9	0,22	5,60	0,07	1,3
MPK 2 (Sta.Cruz)	4,56	4,12	3,77	0,22	4,8	0,15	4,00	0,02	0,5
MPK 3 (Dorneda)	3,8	2,72	2,51	0,27	7,1	0,29	2,81	0,01	0,4
MPK 4 (Mera)	4,56	4,05	3,56	0,11	2,4	0,29	4,11	0,01	0,2
MPK 5 (Mesón)	3,29	2,88	2,46	0,22	6,7	0,1	1,59	0,03	1,9
MPK 6 (Cecebre)	20,01	18,62	11,96	1,01	5,0	0,23	--	--	--
MPK 7 (Bastigueiro)	7,99	5,82	5,54	2,05	25,7	0,065	2,05	0,33	16,1
MPK 8 (Vilaboa)	6,2	4,5	4,43	1,62	26,1	0,08	1,62	0,76	46,9

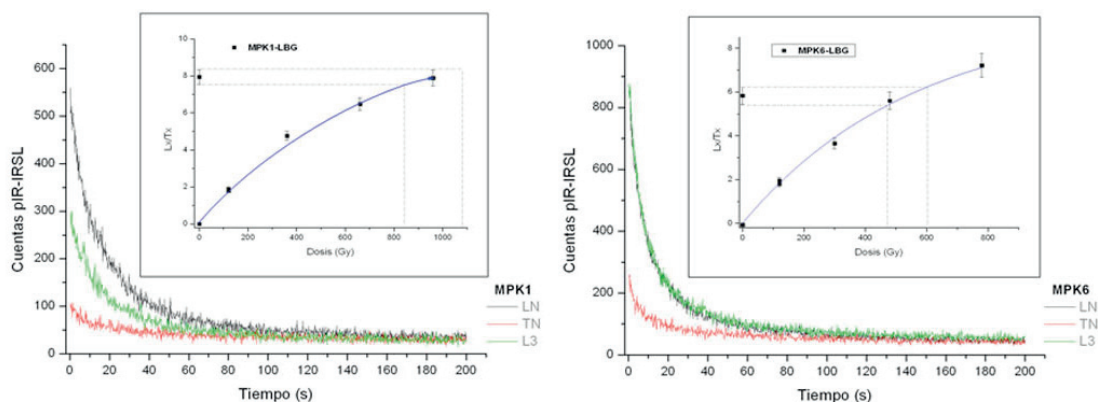
**Tabla 56.** Peso (P.) en gramos de la fracción inicial fina ( $<63\mu\text{m}$ ) –tratada con clorhídrico, peróxido y oxalato- así como masa y porcentaje de las fracciones separadas mediante centrifugado correspondientes a los tamaños de partícula  $1-4\mu\text{m}$  ,  $4-11\mu\text{m}$  y  $11-63\mu\text{m}$ .

Muestra	P.inicial ( $<63\mu\text{m}$ )	P. $0-4\mu\text{m}$	% $0-4\mu\text{m}$	P. $4-11\mu\text{m}$	% $4-11\mu\text{m}$	P. $11-63\mu\text{m}$	% $11-63\mu\text{m}$
MPK 1 (Bribes)	7,34	0,62	8,45	0,42	5,72	3,42	46,59
MPK 2 (Sta.Cruz)	7,77	0,79	10,17	0,35	4,50	3,29	42,34
MPK 3 (Dorneda)	13,1	1,01	7,71	0,67	5,11	4,02	30,69
MPK 4 (Mera)	16,79	0,306	1,82	0,222	1,32	11,8	70,28
MPK 5 (Mesón)	10,56	0,742	7,03	0,4	3,79	4,5	42,61
MPK 6 (Cecebre)	12,46	0,42	3,37	0,489	3,92	7,72	61,96

En la figura (Fig. 8.10.15) se representa la curva de caída para la señal pIR-IRSL obtenida a partir de grano grueso de feldespato para las muestras MPK4 (Mera) y MPK8 (Vilaboa) y en la figura (Fig. 8.10.16) se representa la señal pIR-IRSL obtenida a partir de la fracción fina ( $4-11\mu\text{m}$ ) a partir de las muestras MPK1 (Bribes) y MPK6 (Cecebre). En ellas se puede observar, al igual que ocurría con la señal OSL a partir de granos de cuarzo para las muestras MPK, una señal de baja intensidad a excepción de la muestra MPK8 que, como se viene reiterando, la procedencia de los materiales que componen el depósito de esta muestra son de naturaleza granítica. Además, en ambas figuras se incluye un recuadro interno en el que se representa la curva de crecimiento para la señal pIR-IRSL normalizada -y obtenida mediante el método LBG- para algunas de las escasas alícuotas que sí interpolan, si bien, la mayoría de ellas lo hacen dentro de la zona lineal de saturación, invalidando las estimaciones. Es por ello por lo que no se obtienen edades con feldespatos para las muestras MPK.



**Figura 8.10.15.** Curva caída de la señal natural pIR-IRSL (LN- en negro), de la señal pIR-IRSL regenerada en el tercer ciclo (L3- en verde) y de la señal natural pIR-IRSL del Test-dose (TN- en rojo) para las muestras MPK4 (Mera) y MPK8 (Vilaboa) a partir de grano grueso. En el recuadro interno se representa la curva de crecimiento generada a partir de la señal normalizada frente a la dosis y en la cual se incluye la interpolación de la señal natural pIR-IRSL en la curva.



**Figura 8.10.16.** Curva caída de la señal natural pIR-IRSL (LN- en negro), de la señal pIR-IRSL regenerada en el tercer ciclo (L3- en verde) y de la señal natural pIR-IRSL del Test-dose (TN- en rojo) para las muestras MPK1 (Bribes) y MPK6 (Cecebre) a partir de la fracción fina (4-11 $\mu$ m). En el recuadro interno se representa la curva de crecimiento generada a partir de la señal normalizada frente a la dosis y en la cual se incluye la interpolación de la señal natural pIR-IRSL en la curva.



## 8.2. Resultados de la serie eólica.

A continuación se describirán los resultados obtenidos referentes a la tasa de radiación (*DR*), a la señal OSL e pIR-IRSL obtenido a partir de grano grueso de cuarzo y feldespato, respectivamente, a las estimaciones de la *De* y el rango de edad calculado para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2, CAF3), Mortaza2, Bornalle, Corme, Langosteira, Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1), Xalfas y Tal, que representan la serie eólica.

### 8.2.1. Tasa de radiación natural ionizante (*DR*).

#### 8.2.1.1. Actividad de los isótopos radiactivos de uranio, torio y potasio.

La actividad de los radioisótopos de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  para las muestras extraídas de los depósitos eólicos se describe en la tabla (Tabla 57), incluyendo los radioisótopos principales de los grupos de equilibrio establecidos, de la misma manera que se hizo para los depósitos fluviales representados por las muestras MPK y ABC.

Para estos depósitos eólicos, conformados principalmente por cuarzo y feldespato potásico, la actividad del  $^{40}\text{K}$  presenta una actividad muy superior al resto de radioisótopos, con rangos que van entre los  $349\pm09(\text{Bq/kg})$  hasta los  $756\pm41(\text{Bq/kg})$ , si bien, para la muestra Xalfas se obtiene un estimación de  $79.5\pm8.7(\text{Bq/kg})$ , mucho menor que el resto. Respecto a la cadena de  $^{232}\text{Th}$ , para la cual no se observa desequilibrio en ninguna de las muestras, los valores son variables dentro de un rango que oscila entre los  $10.9\pm1.1$  y los  $82\pm3(\text{Bq/kg})$ , si bien, para la cadena de  $^{238}\text{U}$ , cuyos valores también varían dentro del rango  $13.4\pm4.2\text{--}68\pm15(\text{Bq/kg})$ , sí se observa un desequilibrio que se evidencia al observar un detrimento de la actividad del  $^{226}\text{Ra}$  respecto al  $^{238}\text{U}$  (Mortaza-2, Bornalle, Corme, Langosteira, CLN-1 y Xalfas) o, como el caso de la muestra Tal, un descenso en la actividad del  $^{210}\text{Pb}$  respecto al  $^{226}\text{Ra}$ . Para todas estas muestras se han de realizar las correcciones oportunas para la estimación de la *DR*. Por su parte, la contribución del  $^{235}\text{U}$  resulta muy escasa.

**TABLA 57.** Actividad de los radioisótopos uranio, torio y potasio (en Bq/Kg) incluyendo su error para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3), Punta Mortaza (Mortaza2), Bornalle, Corme, Punta Langosteira (Langosteira), Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1), Xalfas y Tal. (AMD: Actividad mínima detectable). También se adjunta la actividad de los radioisótopos de Ra-226 y Pb-210, y de Ra-228 y Th-232, como elementos principales de los grupos de equilibrio establecidos para las series de U-238 y Th-232.

Actividad (Bq/Kg)	Serie U-238			Serie Th-232			U-235	K-40
	U-238 →	Ra-226→	→Pb-210	Th-232→	Ra-228→	→Th-232		
CAF-1	18±2.4	18±2.4	28±13	20.5±2.6	20.5±2.6	20.3±2.8	<AMD	660±38
CAF-2	27±13	18.6±2.1	23±13	19.6±2.8	19.6±2.8	19.6±3	<AMD	570±35
CAF-3	19±12	15.6±2.2	15±2.9	15.9±4.8	15.9±4.8	15.7±5.4	<AMD	485±31
Mortaza-2*	68±14	30±1	30±4	82±3	82±3	82±3	3.2±0.6	349±09
Bornalle*	24.2±5.8	13.7±1	37±2.7	11±0.6	10.8±1.6	11±0.7	<AMD	676±63
Corme*	53±13	16.9±1.1	59±23	13.9±0.9	14.5±2.3	13.9±0.9	3.02±0.46	552±51
Langosteira*	48±12	21±1.6	52±21	43.3±3.6	43±8.6	43.4±3.9	2.28±0.56	539±50
CLN-1 *	60±18	21.8±2.4	<AMD	18.6±4.2	18.6±4.2	18.6±4.2	4.3±1.2	756±41
XALFAS*	183±38	59.7±4.3	145±19	10.9±1.1	11.1±2.4	10.9±1.2	8.7±1.2	79.5±8.7
TAL*	13.4±4.2	17.3±1.1	43±15	17.4±1	17.4±1	17.4±1	<AMD	475±45

#### 8.2.1.2. Humedad y saturación: porcentaje en agua y atenuación de la DR.

En la tabla (Tabla 58) se describen los porcentajes de humedad, saturación, relación entre ambas, estimación del contenido en agua durante el tiempo de enterramiento, espesor del depósito y la profundidad a la que se tomó la muestra. Respecto a la humedad, los porcentajes varían entre el 0.67 y el 8.48%. Por su parte, el porcentaje de saturación presenta valores entre el 11 y el 31%. En base a estos valores se obtiene la relación entre humedad y saturación, cuyo ratio varía entre 11 y 30, a excepción de las muestras de Punta Mortaza (Mortaza-2), Xalfas y TAL, con una relación por debajo de 5. Como, a partir de esta relación se estima la cantidad de agua en el sedimento durante el tiempo de enterramiento, para la muestra Corme se calcula este valor como el correspondiente al 30% del valor de saturación y un 10% del mismo para el error. Para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF-1, CAF-2, CAF-3), Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN-1), Langosteira y Bornalle, la estimación es de un 20% del valor de saturación y, para el error, también un 10%. Por último, para la muestra Mortaza-2 esta estimación se obtiene a partir de un 5% del valor de saturación y un 2.5% para el error. Los valores representados en la misma tabla para esta estimación (W) serán los que se apliquen como corrección de la atenuación de la  $DR_{TOTAL}$  causada por el agua contenida en el sedimento.

**Tabla 58.** Porcentajes de humedad (H%) y saturación (Sat%) calculados en laboratorio, incluyendo la proporción de humedad respecto a la saturación (%Hum/sat) y la estimación del factor de atenuación de la DR por contenido en agua asumiendo un porcentaje de saturación de agua del 30% (W30%), del 20% (W20%) y del 5% (W5%) a lo largo del tiempo de enterramiento. La profundidad (Prof.) hace referencia a la distancia en la vertical desde punto de muestreo hasta la superficie del propio depósito de donde se extrajo la misma, y el espesor (Esp.), a la potencia del depósito en la vertical.

Muestra	H (%)	Sat.(%)	(%Humedad/ Saturación)	W (30%)	Prof. (cm)	Esp. (cm)
Corme	8,48	28,28	30,00	8,5±2,8	100	150
				W (20%)		
CAF-1 (Cíes- Figueira)	2,26	14,78	15,31	3,0±1,5	200	300
CAF-2 (Cíes- Figueira)	2,30	20,35	11,31	4,1±2,0	145	300
CAF-3 (Cíes- Figueira)	2,44	19,36	12,63	3,9±1,9	80	300
CLN-1 (Cíes- Lagoa)	4,69	31,15	15,06	6,2±3,1	100	150
Langosteira	4,58	27,59	16,59	5,5±2,8	150	400
Bornalle	4,47	19,43	23,02	3,9±1,9	100	200
				W (5%)		
Mortaza-2	0,80	24,42	3,28	1,2±0,6	50	150
XALFAS	0,96	22,43	4,30	1,1±0,6	50	100
TAL	0,67	21,44	3,15	1,1±0,5	120	200

8.2.1.3. Componentes de la tasa de radiación natural del medio y estimación de la DR<sub>TOTAL</sub>.

En la tabla (Tabla 59) se describen los valores que presentan cada una de las componentes gamma, beta, cósmica y total de la DR de las muestras para las cuales se ha realizado OSL. La componente gamma presenta valores que varían dentro del rango 0.76±0.06 a 1.80±0.55(Gy/ka) y la componente beta entre 0.81±0.09 a 1.86±0.25(Gy/ka). Respecto a la dosis cósmica, el rango se sitúa entre 0.16 y 0.19±0.01(Gy/ka). Así, la DR<sub>TOTAL</sub> presenta unos valores que oscilan entre 1.94±0.07(Gy/ka) hasta los 3.60±0.80(Gy/ka).

Respecto a las muestras para las cuales se ha analizado la señal pIR-IRSL, en la tabla (Tabla 60) se describen los valores que presentan las componentes gamma, beta, alfa (con su valor-a) de la DR y de la DR<sub>TOTAL</sub>. Los valores obtenidos para la componente gamma varían entre 0.90±0.07(Gy/ka) y 1.26±0.13(Gy/ka). La componente beta, entre 2.32±0.14(Gy/ka) y 3.01±0.21(Gy/ka). Respecto a la componente alfa (generada por la auto-irradiación del feldespato potásico del cual se extrae la señal pIR-IRSL), se mantiene entre 0.09 y 0.10(Gy/ka), con un error de 0,1. Así, la DR<sub>TOTAL</sub> presenta, para estas muestras, unos valores que varían dentro del rango que va desde los 3.29±0.26(Gy/ka) hasta los 4.17±0.21(Gy/ka).

**Tabla 59.** Cuantificación de la radiación ionizante para cada una de las componentes de la tasa de radiación natural del medio o *Dose-rate* (DR) medida en (Gy/ka) con su error (e) correspondiente: Dosis gamma ( $DR_{\text{GAMMA}}$ ), dosis beta ( $DR_{\text{BETA}}$ ), dosis cósmica ( $DR_{\text{CÓSMICA}}$ ) y dosis total ( $DR_{\text{TOTAL}}$ ) para OSL. Para las muestras con desequilibrio en la cadena de U-238 se han estimado estos valores asumiendo equilibrio y asumiendo desequilibrio (d).

Muestra	$DR_{\text{GAMMA}}$	$DR_{\text{BETA}}$	$DR_{\text{CÓSMICA}}$	$DR_{\text{TOTAL}}$
CAF-1 (Cíes-Figueira)	0,93±0,16	1,78±0,35	0,16±0,01	2,7±0,39
CAF-2 (Cíes-Figueira)	0,88±0,15	1,62±0,33	0,17±0,01	2,49±0,36
CAF-3 (Cíes-Figueira)	0,79±0,13	1,33±0,27	0,19±0,01	2,11±0,30
Mortaza-2	1,80±0,55	1,80±0,58	0,18±0,01	3,60±0,80
Mortaza-2(d)	1,51±0,44	1,46±0,47	"	2,97±0,64
Xalfas	1,68±0,28	1,86±0,25	0,16±0,01	3,54±0,37
Xalfas(d)	0,77±0,07	0,81±0,09	"	1,59±0,11
TAL	0,76±0,07	1,18±0,14	0,16±0,01	1,94±0,16

**Tabla 60.** Cuantificación de la radiación ionizante para cada una de las componentes de la tasa de radiación natural del medio o *Dose-rate* (DR) medida en (Gy/ka) con su error (e) correspondiente: Dosis gamma ( $DR_{\text{GAMMA}}$ ), dosis beta ( $DR_{\text{BETA}}$ ), dosis cósmica ( $DR_{\text{CÓSMICA}}$ ) y dosis total ( $DR_{\text{TOTAL}}$ ) para pIR-IRSL; Para las muestras con desequilibrio en la cadena de U-238 se han estimado estos valores asumiendo equilibrio y asumiendo desequilibrio (d); Para la muestra Bornalle se ha realizado un lixiviado de la muestra (Lix.) antes del análisis de actividad isotópica.;(a-value) valor de atenuación de la componente alfa (Ref. Aitken, 85).

Muestra	$DR_{\text{GAMMA}}$	$DR_{\text{BETA}}$	$DR_{\text{ALPHA}}$	$DR_{\text{CÓSMICA}}$	$DR_{\text{TOTAL}}$
Bornalle(Lix.)	1,02±0,12	2,64±0,22	0,09±0,1	0,18±0,01	3,75±0,27
Bornalle(Lix.)(d)	0,93±0,08	2,53±0,17	0,09±0,1	"	3,56±0,21
Corne	1,21±0,18	2,67±0,26	0,09±0,1	0,18±0,01	3,97±0,33
Corne(d)	0,90±0,07	2,32±0,14	0,09±0,1	"	3,32±0,19
Langosteira	1,26±0,13	2,56±0,17	0,10±0,1	0,10±0,1	3,92±0,23
Langosteira(d)	0,95±0,11	2,43±0,16	0,10±0,1	"	3,48±0,22
CLN-1 (Cíes-Lagoa)	1,19±0,12	3,01±0,21	0,10±0,1	0,18±0,01	3,29±0,26
CLN-1(d) (Cíes-Lagoa)	1,17±0,11	2,90±0,14	0,10±0,1	"	4,17±0,21

(a-value: 0.10)

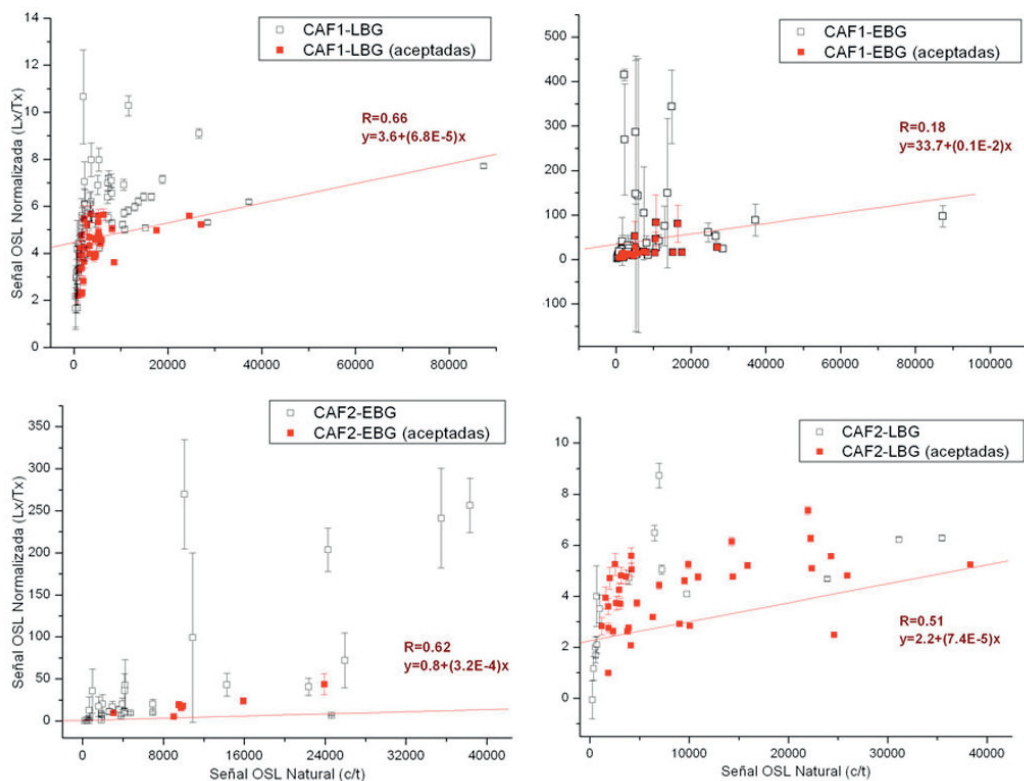
## 8.2.2. Características de la señal OSL y pIR-IRSL para la serie eólica.

### 8.2.2.1. Señal Natural OSL y Señal OSL Normalizada para la serie eólica.

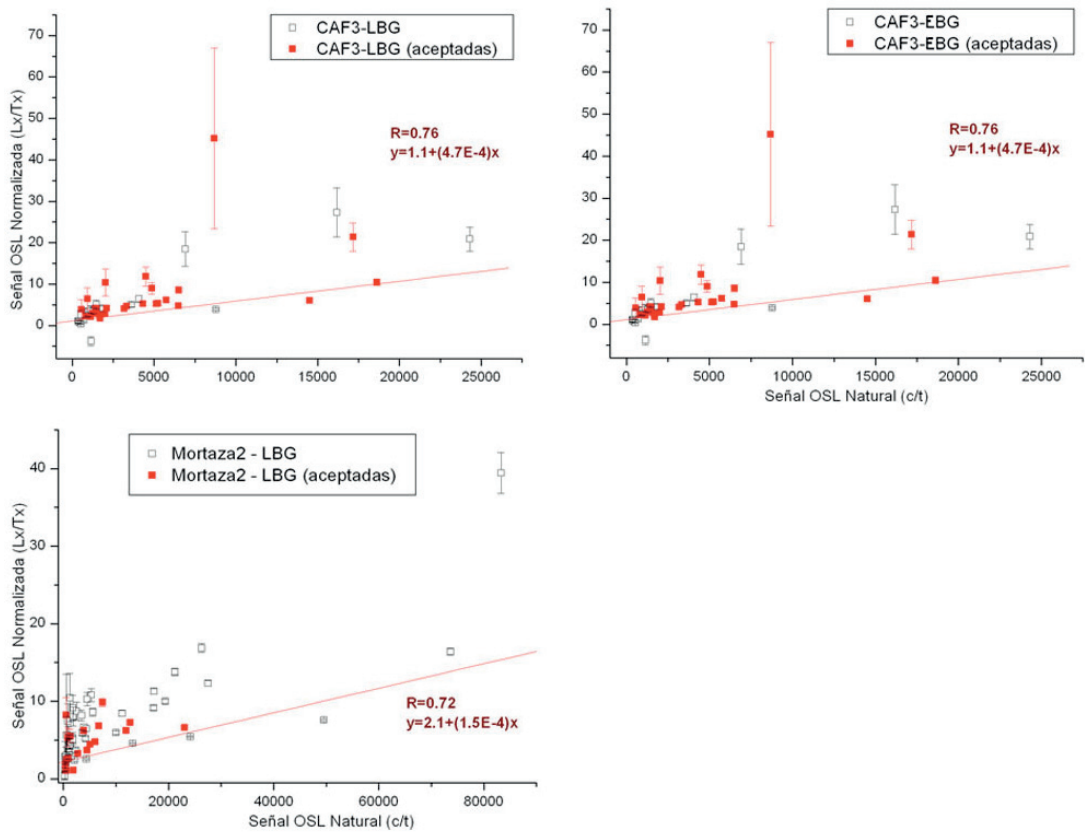
En las figuras siguientes (Fig. 8.11.1, 8.11.2 y 8.11.3) se describe la intensidad de la señal natural OSL ( $L_N$ ) para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3), Mortaza2, Xalfas y TAL, extraída de alícuotas de 100 granos de cuarzo, aproximadamente, así como el ratio de la señal natural OSL normalizada ( $L_N/T_N$ ) y su relación entre ellas. En estos gráficos de dispersión se incluyen todas las alícuotas que interpolan así como todas las que superan, finalmente, los criterios de aceptación (estas últimas en color rojo), tanto para el método de integración LBG como EBG.

La señal natural OSL que presentan las alícuotas aceptadas para las muestras CAF1, CAF2 y CAF3 (Cíes-Alto da Figueira) no supera, de forma generalizada, las 30.000 (c/t), como se puede observar en las figuras (Fig. 8.11.1 y 8.11.2). También se puede observar en la misma figura como el valor de los coeficientes de correlación lineal (estimados a partir del ajuste lineal aplicado) varían en función del método de integración empleado. Así, la muestra CAF1 presenta un coeficiente R de 0.66 mediante el método LBG, y valores por debajo de 0.2 para la señal OSL extraída al aplicar el método EBG. La muestra CAF2, pasa de un coeficiente R de 0.5 mediante el método LBG a 0.6 mediante el método EBG, y la muestra CAF3 presenta un coeficiente R de 0.73 y 0.76, para los métodos LBG y EBG, respectivamente. Así, en base a estos resultados no se puede asumir una correlación de tipo lineal clara entre ambas señales si bien, sí se observa una tendencia positiva generalizada en donde, a medida que se incrementa la intensidad de la señal natural OSL, aumenta el ratio ( $L_N/T_N$ ) que presenta la señal OSL normalizada para estas muestras, como también se puede observar una reducción del error asociado de la señal normalizada a medida que se incrementa la intensidad de la señal OSL natural.

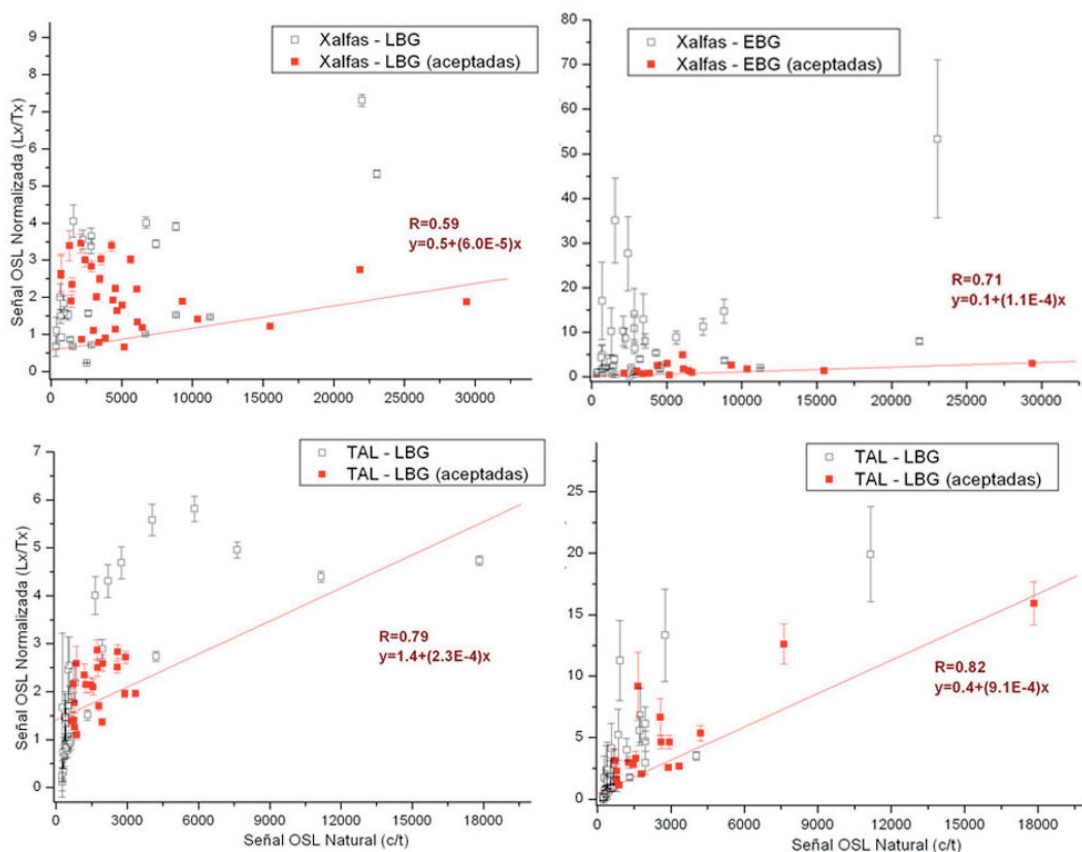
Por su parte, el conjunto de alícuotas aceptadas para la muestra Mortaza2 presentan una señal natural OSL de intensidad baja, con valores por debajo de las 25.000(c/t), como se puede observar en la figura (Fig. 8.11.2). En general, el error asociado de la señal natural normalizada ( $L_N/T_N$ ) es muy reducido y su ratio tiende a aumentar a medida que se incrementa la intensidad de la señal natural OSL, si bien, con un coeficiente de correlación R de 0.72, no se puede asumir una correlación de tipo lineal entre ambas señales. En la misma figura y respecto a las muestras Xalfas y Tal, la intensidad de la señal natural OSL es más reducida todavía, con un rango que no sobrepasa, de forma generalizada, las 10.000(c/t) (Fig. 8.11.3). También se puede observar una cierta tendencia positiva entre la señal natural OSL y el ratio de la señal natural OSL normalizada ( $L_N/T_N$ ), obteniéndose incluso, para la muestra TAL, al emplear el método EBG, un coeficiente R de 0.82. Como ocurre en el resto de muestras de las que se ha extraído la señal OSL, el error asociado a la señal normalizada se reduce al incrementarse la intensidad de la señal natural OSL.



**Figura 8.11.1.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para los métodos de integración LBG y EBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras CAF1 y CAF2 (Cíes-Alto da Figueira). Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).



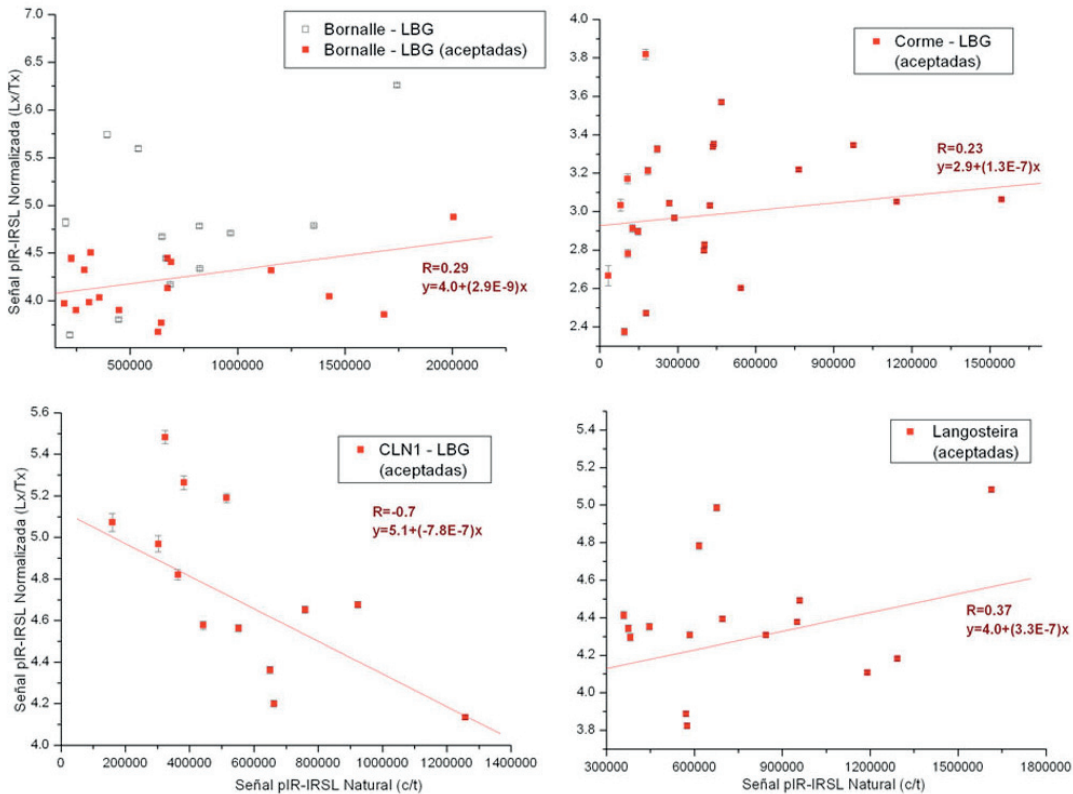
**Figura 8.11.2.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), para los métodos de integración LBG y EBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras CAF3 (Cíes-Alto da Figueira) y Mortaza2 (Punta Mortaza). Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).



**Figura 8.11.3.** Señal natural OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal natural OSL medida en cuentas por unidad de tiempo ( $c/t$ ), empleando los métodos de integración LBG y EBG, destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ , para las muestras Xalfas y TAL. Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).



Por último, la señal natural pIR-IRSL analizada de las muestras Bornalle, Corme, CLN-1 (Cíes-Lagoa dos Nenos) y Langosteira (en Punta Langosteira), se caracteriza por un número de cuentas muy elevado lo que se traduce en una señal muy intensa, como se puede observar en la figura (Fig. 8.11.4), en la que, además, se observa una señal natural normalizada ( $L_x/T_x$ ) con un error asociado muy bajo y un ratio cuyos valores son independientes de la intensidad de la señal natural pIR-IRSL, con coeficientes de correlación  $R$  muy bajos ( $<0.5$ ), e incluso negativos (para la muestra CAL1 se obtiene un  $R$  de  $-0.7$ ), y una pendiente de la recta poco pronunciada.



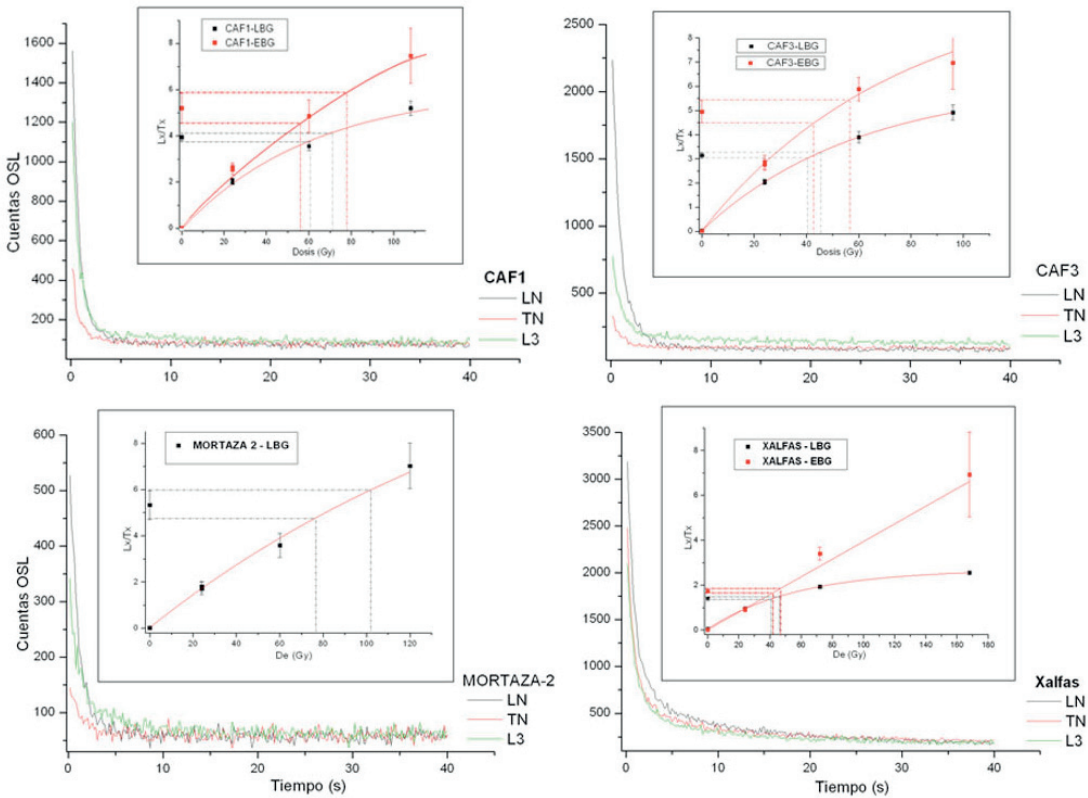
**Figura 8.11.4.** Señal natural pIR-IRSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la señal pIR-IRSL natural medida en cuentas por unidad de tiempo (c/t) destacando en color rojo aquellas alícuotas aceptadas y de las cuales se obtiene una estimación individual de  $D_e$ . Se incluye la ecuación de la recta de ajuste lineal y su coeficiente de regresión ( $R$ ).

### 8.2.2.2. Curva Caída y curva de crecimiento para la serie eólica.

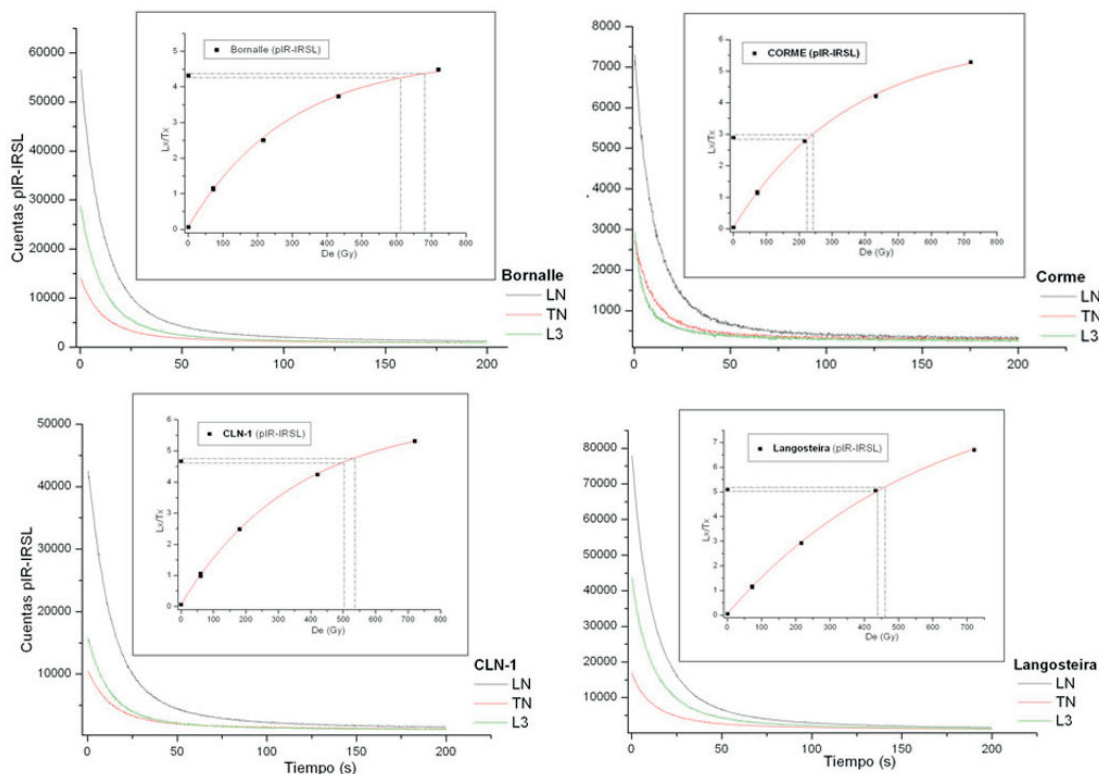
En la figura (Fig. 8.12.1) se representa la curva de caída de la señal OSL natural ( $L_N$ ), la señal regenerada en el tercer ciclo ( $L_3$ ) y la señal natural OSL extraída al aplicar el *test-dose* en el primer ciclo ( $T_N$ ), de aquellas muestras pertenecientes a los depósitos eólicos y de las cuales se ha analizado la señal OSL. Como cabe esperar, la señal natural del *Test-dose* ( $T_N$ ) presenta una intensidad mucho menor que las señales ( $L_N$ ) y ( $L_3$ )-aunque en ocasiones, y como ocurre en la alícuota representada para la muestra Xalfas, la señal ( $T_N$ ) se solapa con la señal ( $L_3$ ) a pesar de las diferencias en la dosis inducida, de más de 40Gy (Ver Tabla 3; Xalfas:  $D_{TX}=20Gy$ ;  $D_{L3}=70Gy$ , aprox.), indicativo, entre otros aspectos, de la reducida sensibilidad de luminiscencia de algunas alícuotas o granos de cuarzo, o su reducido umbral de saturación para el método LBG (Fig. 8.12.1). Por su parte, la señal natural OSL ( $L_N$ ) experimenta una reducción próxima al 90% al transcurrir dos segundos de estímulo lumínico y alcanzando niveles de fondo a partir de los diez segundos.

En el recuadro interno de las mismas figuras se representa la curva de crecimiento generada a partir de las mismas alícuotas aplicando el método LBG y el método EBG (a excepción de Mortaza 2, para la cual solo es emplea el primero) y en donde se observa un incremento en el ratio de la señal OSL normalizada para cada uno de los ciclos del SAR al emplear el método de integración EBG, interpolando en la zona de crecimiento lineal de la curva. También se observa, para el método EBG un incremento del error, si bien, las estimaciones de la *De* son, generalmente, similares.

Por su parte, en las figuras figura (Fig. 8.12.2) se representa la curva de caída de la señal natural pIR-IRSL ( $L_N$ ) la señal natural pIR-IRSL del *Test-dose* ( $T_N$ ) y la señal pIR-IRSL, correspondiente al tercer ciclo ( $L_3$ ), extraídas a partir de un estímulo infrarrojo continuado durante doscientos segundos. La señal natural ( $L_N$ ), de mayor intensidad que el resto, decrece cerca de un 80% al transcurrir veinte segundos y alcanza niveles de fondo tras cien segundos de estímulo. Además, en el recuadro interno de la misma figura se representa la curva de crecimiento de la señal pIR-IRSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) en donde cabe destacar el reducido error asociado tanto de la señal natural como de la regenerada en cada uno de los ciclos del SAR modificado, frente a la dosis.



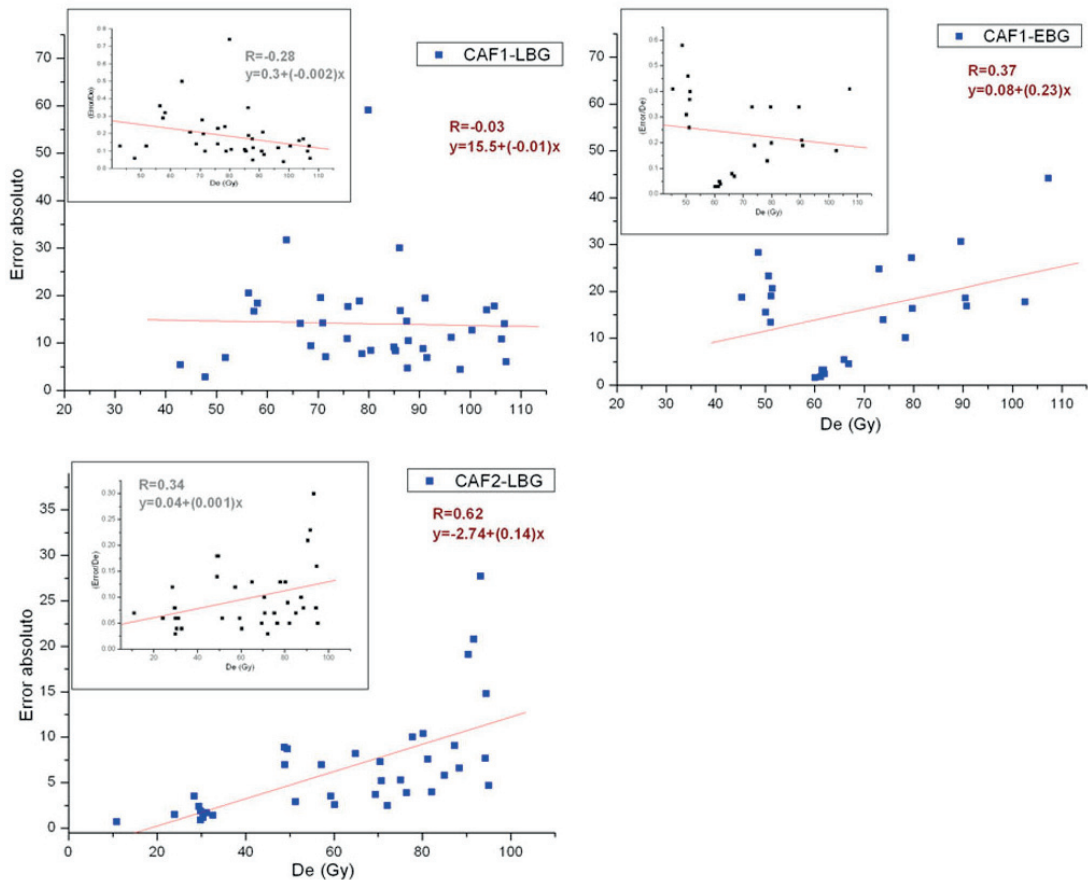
**Figura 8.12.1.** Curva de caída de la señal OSL natural ( $L_N$ ), la señal OSL del *Test-dose* natural ( $T_N$ ) y la señal OSL regenerada en el segundo ciclo del SAR ( $L_3$ ) extraídas de alícuotas representativas para las muestras de Cies-Alto da Figueira (CAF1 y CAF3), Mortaza-2 y Xalfas (no se representan las muestras CAF2 y la muestra TAL por ser similares a CAF1 y Xalfas, respectivamente), en donde se representan las cuentas de luminiscencia detectadas (eje Y) por unidad de tiempo (eje X). En el recuadro interno se representan las curvas de crecimiento de las mismas alícuotas al aplicar un SAR y empleando los métodos LBG y EBG, y en donde se enfrenta la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la dosis, en grays (Gy).



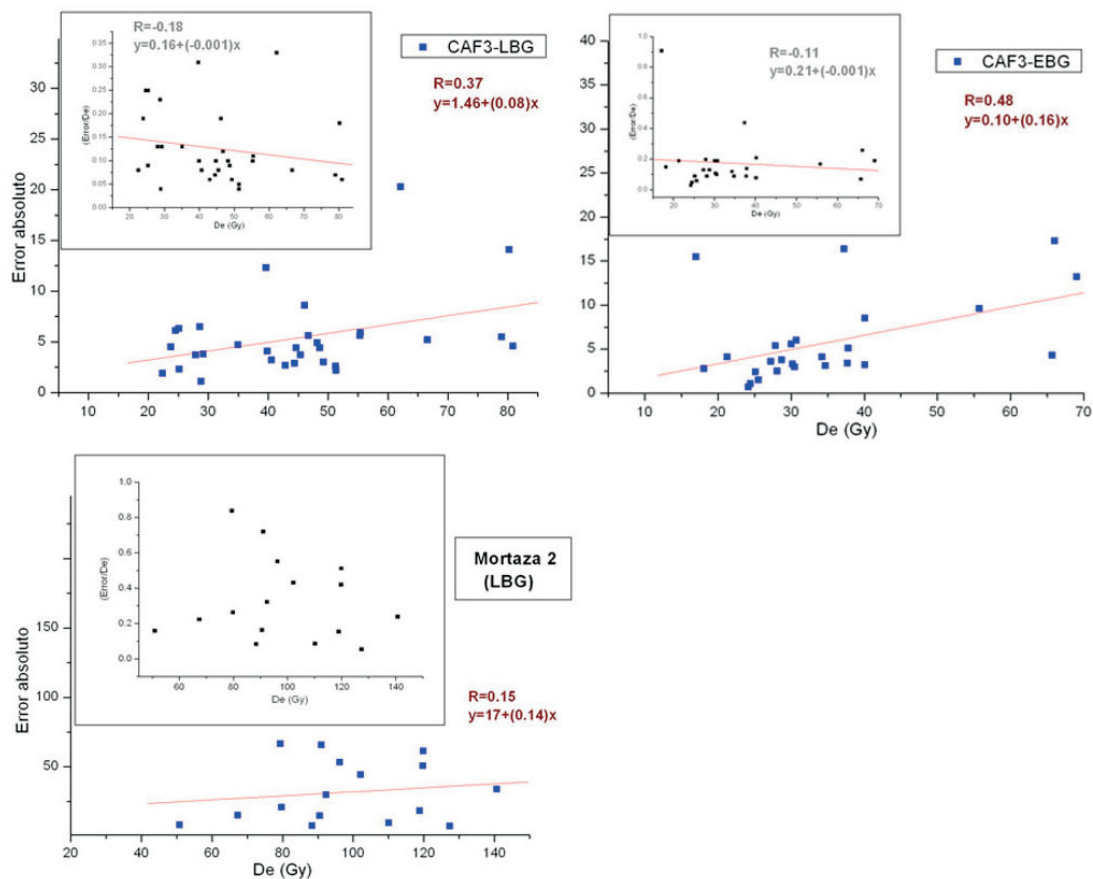
**Figura 8.12.2.** Curva de caída de la señal pIR-IRSL natural ( $L_N$ ), la señal pIR-IRSL del *Test-dose* natural ( $T_N$ ) y la señal pIR-IRSL regenerada en el segundo ciclo del SAR ( $L_3$ ) extraídas de alícuotas representativas para las muestras Bornalle, Corme, Cíes- Lagoa dos Nenos (CLN-1) y Langosteira, en donde se representan las cuentas de luminiscencia detectadas (eje Y) por unidad de tiempo (eje X). En el recuadro interno se representan las curvas de crecimiento de las mismas alícuotas al aplicar un SAR y empleando el método de integración LBG, y en donde se enfrenta la señal OSL normalizada ( $L_x/T_x$ ) frente a la dosis, en grays (Gy).

### 8.2.2.3. Error absoluto y error relativo para la serie eólica.

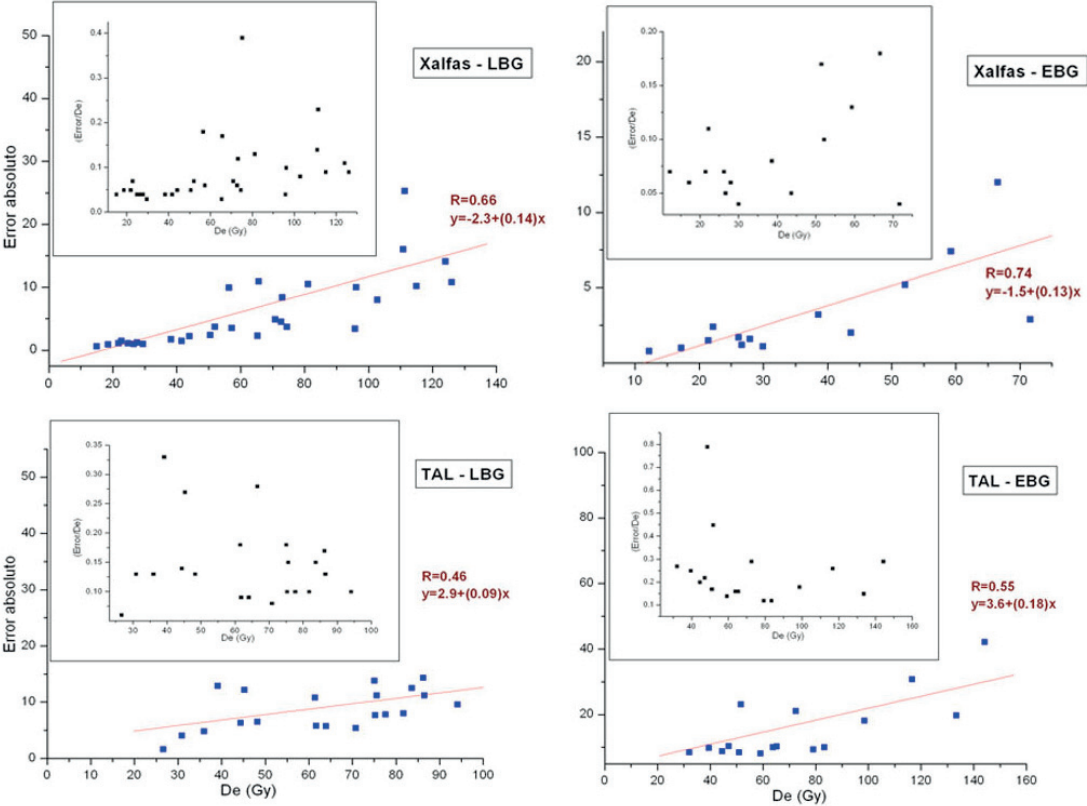
La magnitud del error en función de la dosis para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3) es elevada, llegando a alcanzar valores de error relativo superiores al 30% (Fig. 8.13.1 y 8.13.2). Por su parte, el error asociado que presenta la muestra Mortaza-2 supera, en algunos casos el 50%, como se puede observar en la figura (Fig. 8.13.2). En la figura (Fig. 8.13.3) el error asociado que presentan las muestras Xalfas y TAL oscila dentro del rango situado entre el 5% y el 20%, llegando a superar en ocasiones el 30%, sin que se observe relación entre la dosis y el error.



**Figura 8.13.1.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras de Cies-Alto da Figueria (CAF1 y CAF2) a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). También se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.

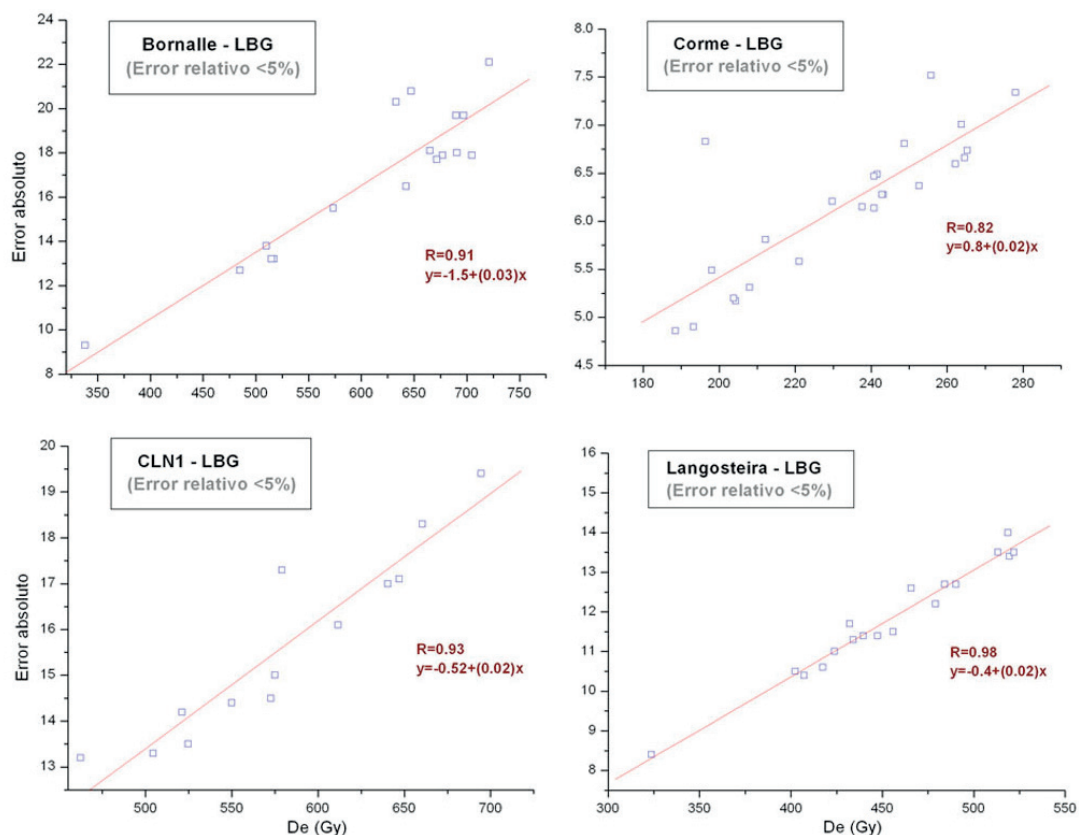


**Figura 8.13.2.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF3) y de Punta Mortaza (Mortaza2), a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). También se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.



**Figura 8.13.3.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras Xalfas y TAL, a partir del método de integración LBG (izq.) y del método EBG (dcha.). En el recuadro interno se representa el error relativo en tanto por uno también frente a la De (Gy). También se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada.

Respecto al error asociado a las estimaciones obtenidas mediante la señal pIR-IRSL, se caracteriza por su baja magnitud, con valores relativos por debajo del 5%, a lo que cabe añadir una tendencia positiva muy marcada entre la dosis y el error absoluto (Fig. 8.13.4), con coeficientes de regresión entre 0.82 y 0.98.

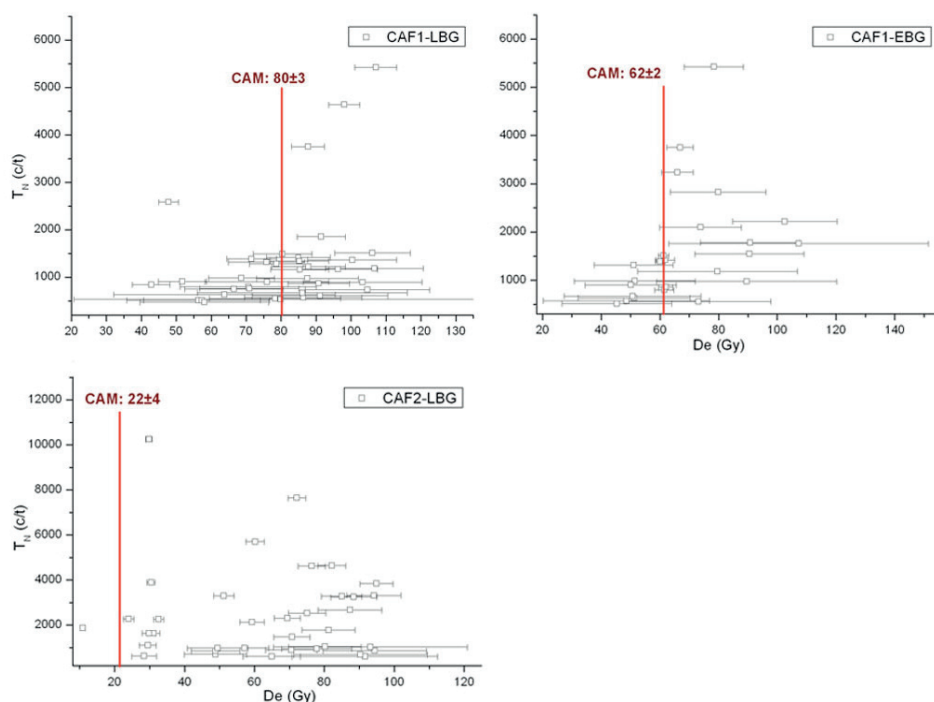


**Figura 8.13.4.** Error Absoluto frente a la De (Gy), para las muestras de Bornalle, Corme, de Cies-Lagoa dos Nenos (CLN-1) y de Punta Langosteira (Langosteira), a partir del método de integración LBG. También se incluye el coeficiente de correlación lineal (R) y la fórmula de la recta de regresión ( $y=b+ax$ ) representada. El dato de error relativo promedio se indica debajo del nombre de cada muestra, siendo inferior al 5%.

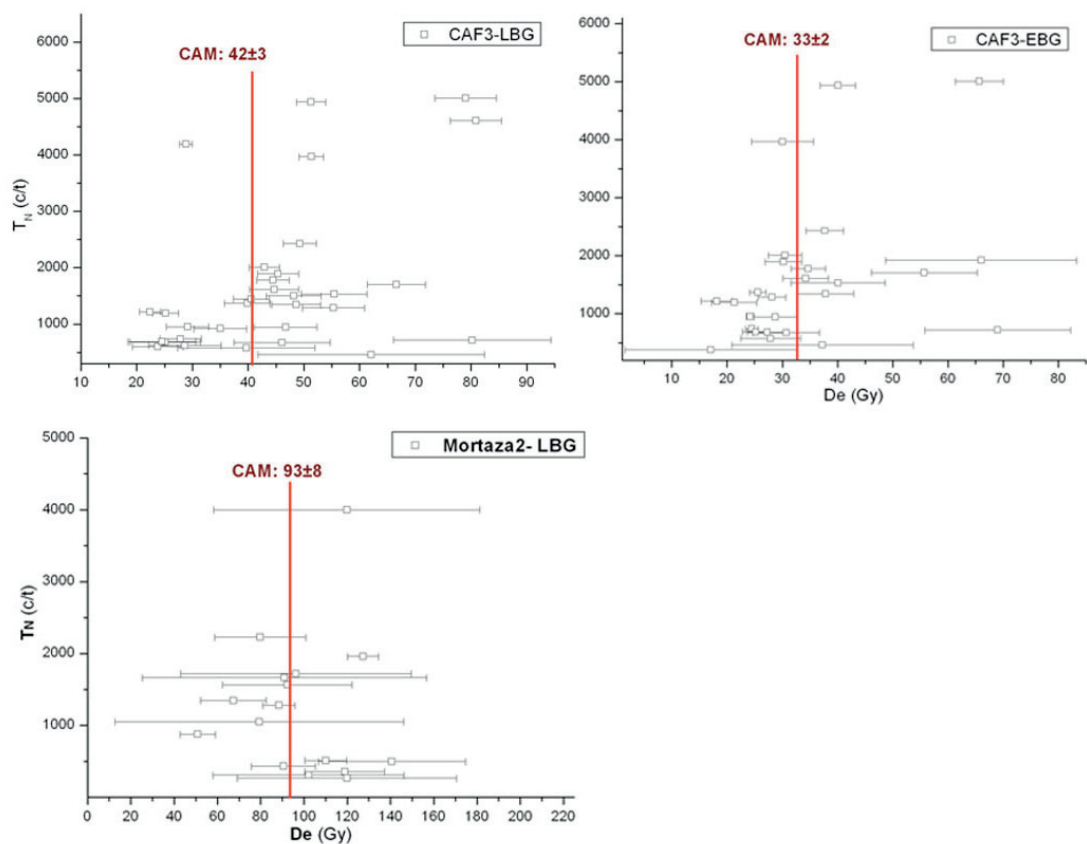


#### 8.2.2.4. *Test-dose*: Señal de normalización de la señal natural OSL y pIR-IRSL para la serie eólica.

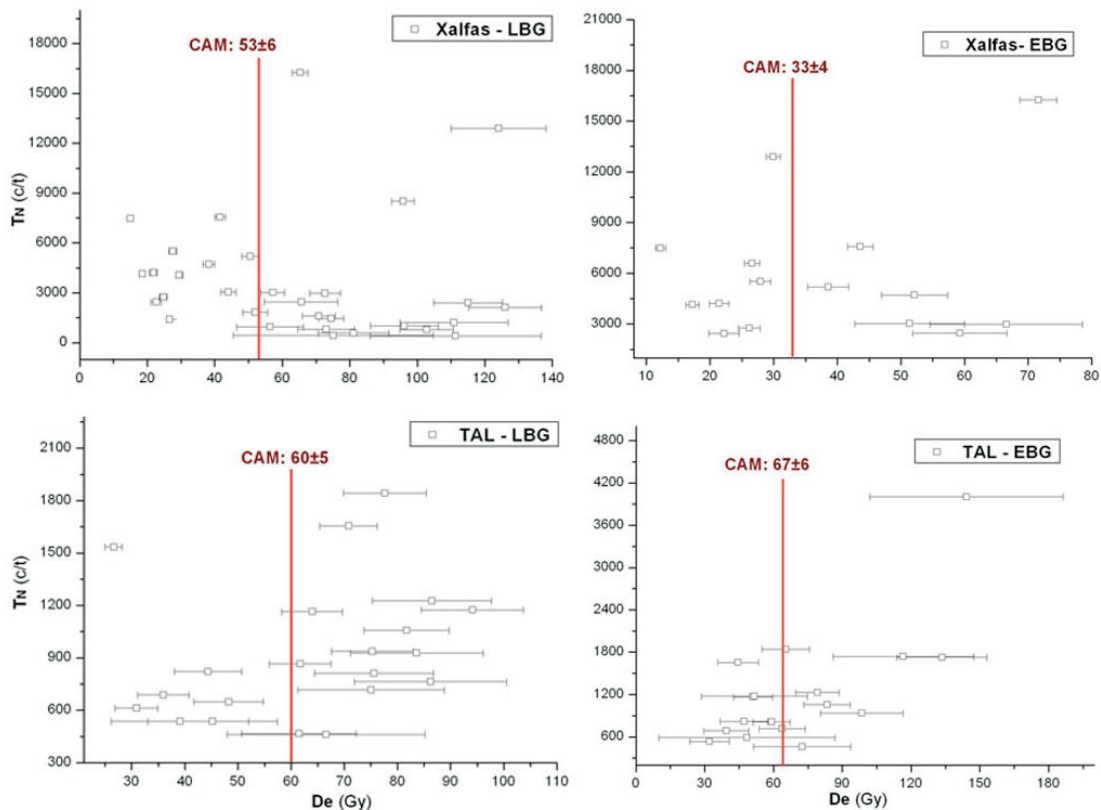
Para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3) la señal natural del *Test-dose* ( $T_N$ ) presenta una distribución en donde el grueso de alícuotas que superan los criterios de aceptación del SAR se agrupan en torno a los valores más bajos, por debajo de las 3000 o 2000(c/t) (Fig. 8.14.1 y 8.14.2). No obstante, y como se puede observar en la misma figura, aquellas alícuotas que presentan una señal  $T_N$  más intensa presentan una estimación de la  $De$  más próxima al promedio ponderado estimado mediante el modelo CAM, aspecto que resulta más patente al emplear el método EBG. Así, y para estas muestras, los granos de cuarzo con una mayor sensibilidad de luminiscencia estarán proporcionando estimaciones más fiables, viniendo acompañados, además de un error asociado menor. La muestra Mortaza-2 presenta una señal  $T_N$  tenue, por debajo de las 2000(c/t) y, si bien, el conjunto de estimaciones individuales se agrupa en torno a la estimación promedio obtenida con el modelo CAM, estas presentan un error muy amplio (Fig. 8.14.2). Por su parte, las muestras Xalfas y TAL presentan una gran dispersión, si bien, para la muestra Xalfas la señal  $T_N$  es más intensa (Fig. 8.14.3).



**Figura 8.14.1.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras CAF1 y CAF2. También se indica la estimación muestral de la  $De$  aplicando el modelo CAM en grays, con su error asociado.

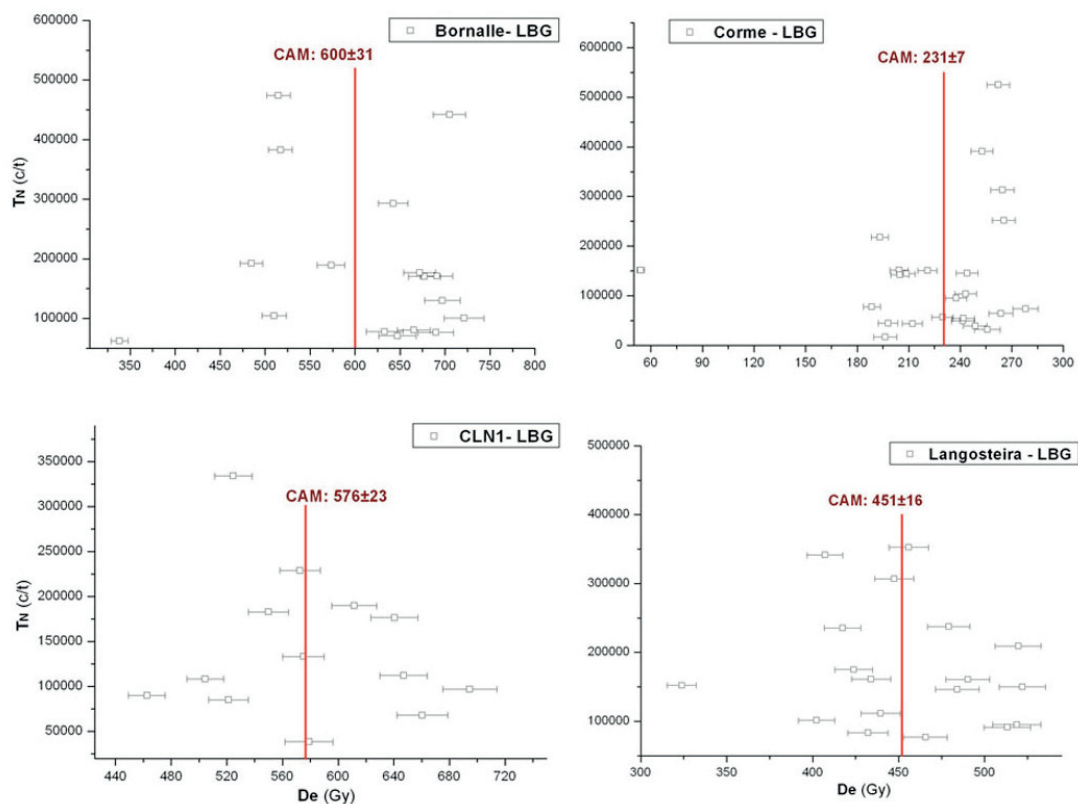


**Figura 8.14.2.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del test-dose ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $De$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras CAF3 y Mortaza2. También se indica la estimación muestral de la  $De$  aplicando el modelo CAM en grays, con su error asociado.



**Figura 8.14.3.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural OSL del test-dose ( $T_n$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $D_e$  individual, en grays (Gy), mediante LBG (izq.) y EBG (dcha.), para las muestras Xalfas y TAL. También se indica la estimación muestral de la  $D_e$  aplicando el modelo CAM en grays, con su error asociado.

Respecto a las muestras Bornalle, Corme, Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN-1) y Langosteira, de las cuales se ha extraído la señal pIR-IRSL, se caracterizan por una señal  $T_N$  muy intensa y cuyas estimaciones se aproximan al promedio estimado mediante el modelo CAM (Fig. 8.14.4). Así, señales intensas a dosis bajas, como las inducidas en el *Test-dose*, implica materiales sensibles a la luminiscencia que, acompañados de un error reducido, presentan una elevada fiabilidad.

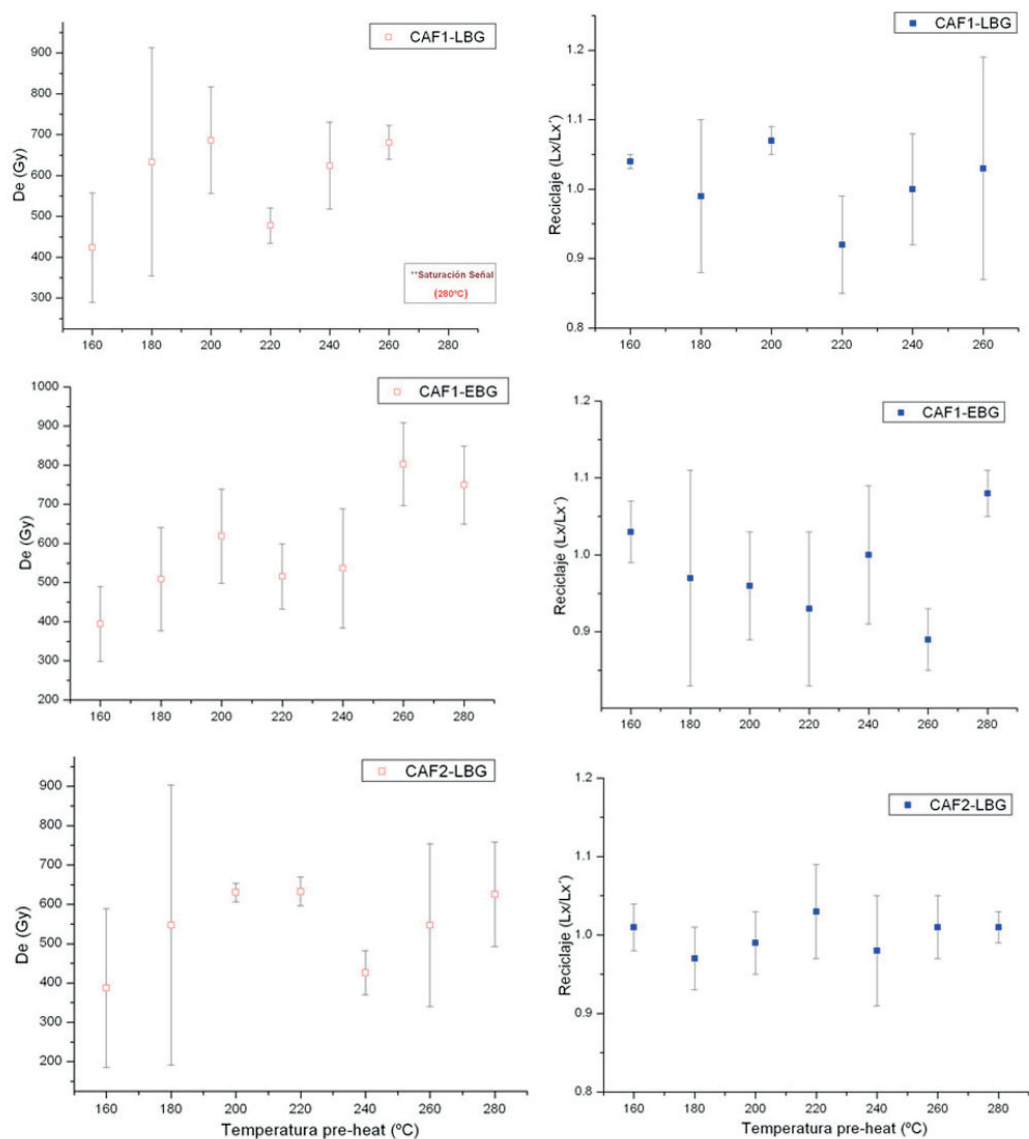


**Figura 8.14.4.** Cuentas por unidad de tiempo (c/t) de la señal natural pIR-IRSL del *Test-dose* ( $T_N$ ) de todas las alícuotas aceptadas, frente a estimación de la  $D_e$  individual, en grays (Gy) para las muestras Bornalle, Corme, Langosteira y CLN1. También se indica la estimación muestral de la  $D_e$  aplicando el modelo CAM en grays, con su error asociado.

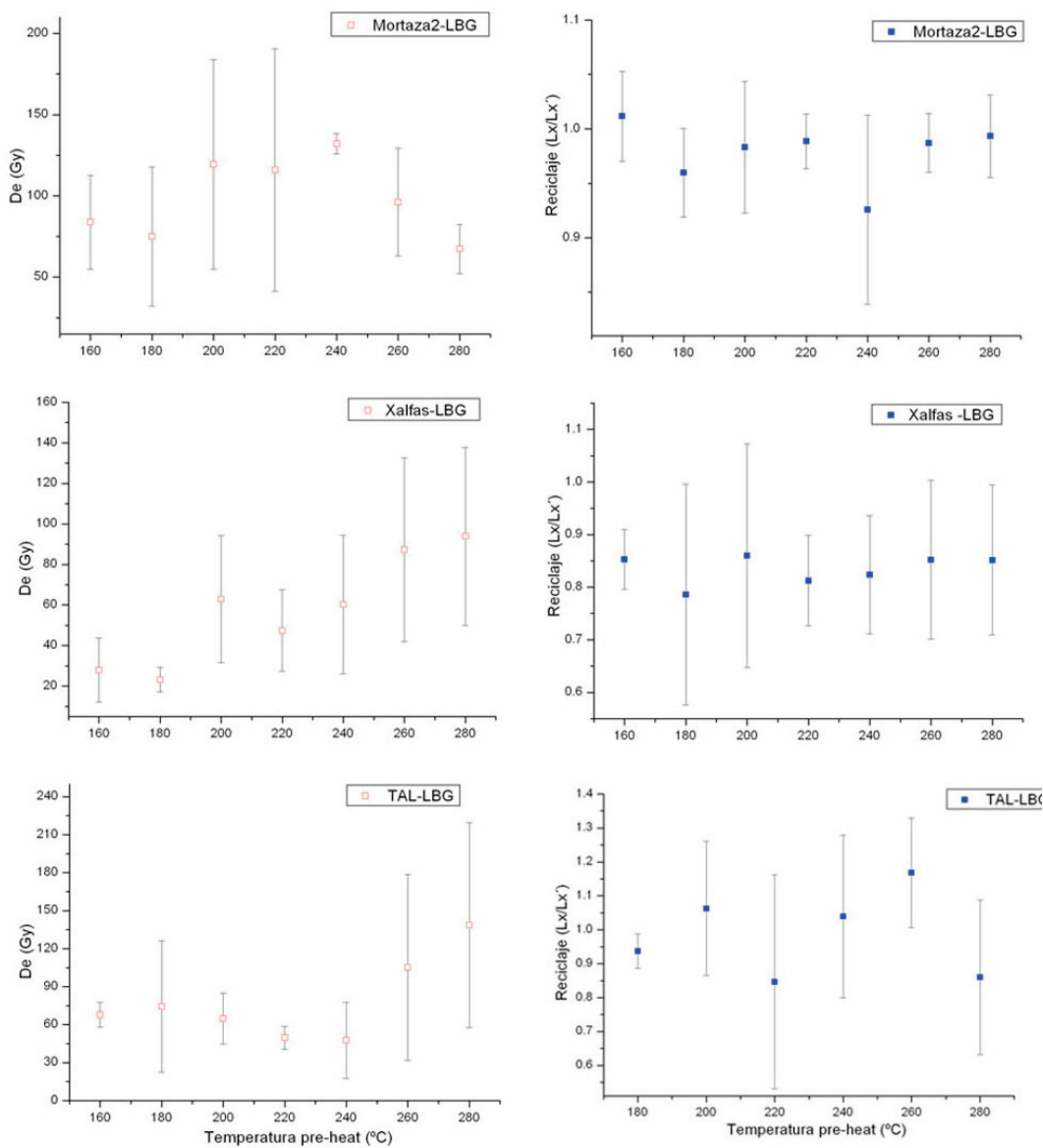
#### 8.2.2.5. Test de *Pre-heat*.

En la figura (Fig. 8.15.1) se representan los resultados obtenidos en el test de *pre-heat* y la tasa su de reciclaje correspondiente, para la muestra CAF1 empleando el método LBG y EBG, observándose una respuesta similar para cada una de las temperaturas aplicadas, y en donde se observa una reducción de las variaciones entre los 180°C y 240°C, datos coinciden con los observados para la muestra CAF3, no representada. También se representa, en la misma figura, los resultado de la muestra CAF2, empleando el método LBG, y en donde la región “*plateau*” parece ubicarse, también, entre los 180°C y los 220°C. En cualquiera de los casos, se ha seleccionado una temperatura de 220°C. Respecto a la tasa de reciclaje, para la muestra CAF1 se observa una mayor dispersión y variabilidad en los resultados que para la muestra CAF2.

En la figura (Fig. 8.15.2) se representa la estimación de la De y la tasa de reciclaje para las muestras Mortaza2, TAL y Xalfas empleando el método LBG (los resultados mediante el método EBG son prácticamente idénticos y no se representan). Para las muestras Mortaza2 y TAL, se observa una región “*plateau*” entre los 160°C y los 220°C, mientras que para la muestra Xalfas, esta región se ubica entre los 200°C y los 240°C. En base a estos resultados, la temperatura de *pre-heat* seleccionada para estas muestras es de 200°C. Respecto a la tasa de reciclaje, se observa una mayor homogeneidad, dentro del rango de aceptación (0.9-1.1) para la muestra Mortaza2, observándose una mayor dispersión y variabilidad para la muestra TAL. La muestra Xalfas, por su parte, presenta una amplia dispersión y valores que, generalmente están centrados fuera de los límites de aceptación, presentando los valores más aceptables para la temperatura de 200°C.



**Figura 8.15.1.** Estimación de la De promedio en función de la temperatura de *pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para la muestra CAF1-LBG (arriba), CAF1-EBG (centro) y CAF2-LBG (abajo).



**Figura 8.15.2.** Estimación de la De promedio en función de la temperatura de *pre-heat* (izq.) y su tasa de reciclaje correspondiente (dcha.) para las muestras, en este orden y de arriba abajo, Mortaza2, TAL y Xalfas, empleando el método LBG.

8.2.2.6. Test de *Dose-recovery* para la serie eólica.

Los resultados que ofrece el test *Dose-recovery* para las muestras de la serie eólica, de las cuales se ha extraído la señal OSL y pIR-IRSL (CAF1, Mortaza2, Xalfas y TAL, para OSL, y Langosteira, Corme, Bornalle y CLN1, para IRSL) se describen en la tabla (Tabla 61). El ratio entre la dosis inducida ( $De'$ ) y la  $De$  estimada entra dentro del rango que valida la aplicación del protocolo SAR para estas muestras. Además, así como ocurría con las muestras fluviales MPK y ABC, los porcentajes de  $OD$  estimada están por debajo del 10%.

**Tabla 61.** Resultados del test *Dose-Recovery* para las muestras CAF1 (Cies-Alto da Figueira), Mortaza2 (Punta Mortaza), Xalfas y TAL, de las cuales se ha extraído la señal OSL empleando el método LBG y EBG (para la muestra Mortaza2 solo se obtienen datos a partir del método LBG) y de las muestras Bornalle, Corme, CLN1 (Cies-Lagoa dos Nenos) y Langosteira de las que se obtiene la señal pIR-IRSL. Se incluye además el número de alícuotas (N) que superan los criterios de aceptación (test de recuperación y reciclaje, y buen ajuste a la curva de crecimiento), la  $De$  (Gy) estimada empleando el modelo CAM (que ofrece además el porcentaje estimado de sobre-dispersión ( $OD$ ) para OSL), y el ratio promedio al dividir la  $De$  estimada entre la  $De$  inducida ( $De'$ ) con la dosis inducida.

Muestras Señal OSL	N	De CAM (Gy)	De' (Gy)	Ratio De'/De	OD (%)
CAF1-LBG	12	47.75±1.76	48	0.99±0.08	6±3
CAF1- EBG	10	43.40±1.53	48	0.99±0.08	<5%
MORTAZA2-LBG	11	48.30±1.73	48	1.01±0.08	6±2
XALFAS-LBG	11	50.32±1.47	48	1.06±0.06	<5%
XALFAS-EBG	11	46.65±1.58	48	0.97±0.10	<5%
TAL-LBG	12	52.22±1.69	48	1.09±0.09	<5%
TAL-EBG	10	48.51±2.15	48	1.02±0.10	8±3
Muestras Señal pIR-IRSL	N	De CAM (Gy)	De' (Gy)	Ratio De'/De	OD (%)
BORNALLE	4	110.16±4.61	108	1.02±0.07	<5%
CORME	4	112.15±3.52	108	1.08±0.02	<5%
CLN1	4	111.89±3.92	108	1.05±0.07	<5%
LANGOSTEIRA	4	115.78±1.12	108	1.12±0.04	<5%

8.2.3. Estimación de la  $De$  y rango de edad.

En la tabla (Tabla 62) se describen las distintas estimaciones de la  $De$  (Gy) para los depósitos eólicos analizados. La media aritmética, con su error asociado estimado como la desviación típica (s.d.) y la mediana, así como la estimación de la media ponderada mediante el modelo CAM, presentan valores similares, si bien, la  $De$  estimada mediante el método LBG incluye un mayor número de estimaciones individuales, lo que se traduce en un mayor número de alícuotas que superan los criterios de aceptación.



Así, las estimaciones realizadas a partir de la señal OSL, no presentan diferencias significativas, independientemente del método de integración empleado, o bien se solapan al incluir el error. Tampoco difieren los porcentajes de OD, a excepción única de CAF1, cuyos valores desciende de un  $20\pm4\%$  empleando el método LBG hasta un  $2\pm1\%$  empleando el método EBG. La utilización del método de integración EBG reduce, hipotéticamente, la contribución de las señales lenta y media, no deseables. Así, en vista de las similitudes en las estimaciones obtenidas al emplear los métodos LBG y EBG, no parece que la contribución de la señal lenta OSL esté afectando a las estimaciones obtenidas mediante la señal OSL ni a los porcentajes de OD estimados.

**Tabla 62.** Número de estimaciones individuales (N) y De (Gy) promedio para las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3), Punta Mortaza (Mortaza2), Xalfas, Tal, Bornalle, Corme, Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) y Punta Langosteira (Langosteira). Se incluyen las estimaciones de la media aritmética y su desviación típica (s.d.), la mediana, la estimación de la De mediante el modelo CAM y el porcentaje de sobre-dispersión (OD) y las estimación mediante los modelos MAM e IEU para la señal OSL. (\*) estimación de la De ponderada (CAM) para la señal pIR-IRSL.

Muestras (LBG/EBG)	N	Media y s.d. (Gy)	Mediana (Gy)	De CAM (Gy)	OD (%)	De MAM (Gy)	De IEU (Gy)
CAF1- LBG	37/96	80,59±17,17	84,95	80,68±3,39	20±4	47,85±2,45	74,50±4,30
CAF1- EBG	24/96	68,86±17,73	63,96	61,84±1,72	2±1	55,21±6,83	60,57±1,61
CAF2- LBG	36/51	62,81±24,77	69,93	56,05±4,78	50±6	22,56±4,61	31,46±3,07
CAF3- LBG	31/51	44,79±16,54	44,66	42,49±2,74	33±5	24,40±3,76	36,99±2,58
CAF3- EBG	26/51	34,89±14,22	30,32	37,78±2,32	30±5	23,72±0,82	24,84±0,96
Mortaza2- LBG	19/74	98,38±23,52	94,275	93,68±8,25	22±7	62,48±7,83	96,11±8,18
Xalfas-LBG	31/56	64,06±33,76	65,26	53,88±6,06	60±8	14,97±0,51	26,87±2,80
Xalfas-EBG	15/56	37,78±18,64	29,94	33,17±4,39	50±9	12,20±0,85	24,24±3,22
TAL – LBG	21/56	63,35±20,15	66,53	60,23±5,14	34±6	28,12±1,52	39,88±4,64
TAL – EBG	17/56	72,33±33,15	63,76	67,90±6,95	36±8	47,43±9,74	59,31±6,14
Bornalle- LBG*	17/30	610,46±104,50	647,27	600,37±31,63	19±3	--	--
Corme- LBG*	24/24	233,04±26,73	240,77	231,59±7,92	11±2	--	--
CLN1- LBG *	13/13	580,26±68,17	574,99	576,53±23,20	11±3	--	--
Langosteira- LBG*	18/26	454,23±51,34	451,68	451,28±16,71	11±2	--	--

En la tabla (Tabla 63) se describe el número de alícuotas analizado mediante el método LBG y EBG, así como la proporción de estas que no interpolan dentro de la curva de crecimiento de la señal OSL o pIR-IRSL debido a que la señal natural está por encima del último punto de regeneración, motivo por el cual se hace referencia a las mismas como alícuotas cuya señal está saturada. La proporción restante estaría compuesta por aquellas alícuotas que sí interpolan. Otro dato que se incluye en la misma tabla es la proporción de alícuotas que presenta error en la curva de crecimiento, afectando, principalmente al método EBG. También se incluye la proporción de alícuotas que finalmente superan los criterios de aceptación y de aquellas que no superan el test de reciclaje, siendo el 100% el número de alícuotas que interpolan. No aparece en la tabla el porcentaje de alícuotas cuya señal natural OSL presente niveles de fondo independientemente de que interpolen dentro de la curva o no (no se da el caso para la señal pIR-IRSL). Este último aspecto afectaría principalmente al emplear el método LBG y a muestras como TAL con un 40%, y Cies-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3) y Mortaza2 con un 15%. Existen, por tanto, para algunas de estas muestras, una proporción considerable de alícuotas que saturan y otra proporción menor de alícuotas cuya señal OSL es desechada por presentar poca intensidad, con valores de fondo.

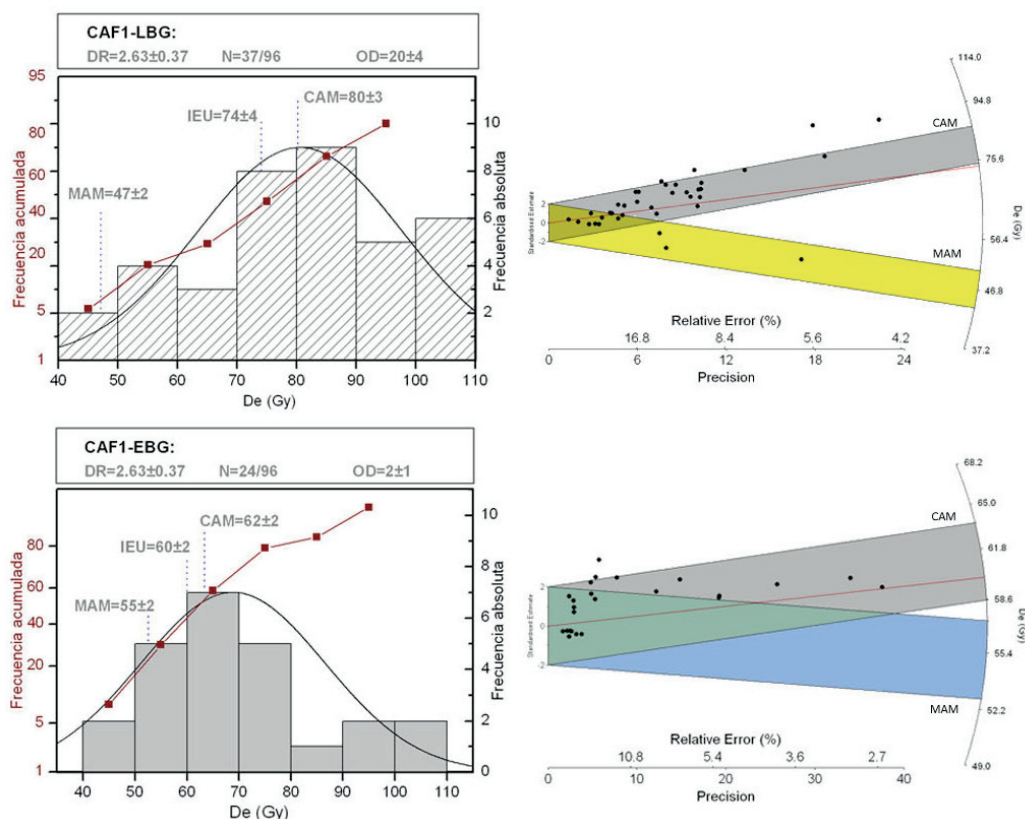
**Tabla 63.** Número total de alícuotas analizadas (N) mediante los métodos LBG y EBG y porcentaje de ellas que no interpolan (Saturación), que presentan error o aberraciones en la curva de crecimiento OSL o pIR-IRSL (estas últimas representadas con un asterisco (\*), porcentaje de alícuotas que son finalmente aceptadas (Aceptación) y que no superan el test de reciclaje (Reciclaje negativo), para las muestras de Cies-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3), Punta Mortaza (Mortaza2), Xalfas, Tal, Bornalle, Corme, Cies-Lagoa dos Nenos (CLN1) y Punta Langosteira (Langosteira).

Muestra	N		Saturación (%)		Error curva (%)		Aceptación (%)		Reciclaje negativo(%)	
	LBG	EBG	LBG	EBG	LBG	EBG	LBG	EBG	LBG	EBG
CAF-1	96	96	42,7	41,7	0,0	22,9	69,8	70,6	11,3	26,5
CAF-2	51	51	17,6	19,6	0,0	54,9	81,0	58,3	4,8	33,3
CAF-3	51	51	5,9	7,8	0,0	9,8	64,6	57,8	18,8	31,1
Mortaza-2	74	66	58,1	45,5	0,0	54,5	50,0	0,0	15,6	0,0
Xalfas	56	56	14,3	37,5	0,0	5,4	64,6	46,9	20,8	50,0
TAL	56	56	14,3	10,7	0,0	12,5	43,8	38,6	8,3	18,2
Bornalle*	30	30	36,7	--	0,0	--	89,5	--	10,5	--
Corme*	24	24	0,0	--	0,0	--	100	--	0,0	--
CLN-1 *	13	13	30,8	--	0,0	--	100	--	0,0	--
Langosteira*	26	26	0,0		0,0	--	100	--	8,3	--

Para estos depósitos eólico-costeros analizados, el porcentaje de alícuotas que no interpola es muy variable, con muestras que presentan un 0% como Corme o un por debajo del 10% como CAF3, y otras, como Mortaza2 que mediante el método LBG presentan hasta un 58% de alícuotas saturadas y un 45% al emplear el método EBG. Respecto a la proporción de alícuotas que presentan error en la curva de crecimiento empleando el método EBG, hay muestras como CAF2 o Mortaza2 que llegan a superar el 50%. Por otra parte, del total de alícuotas que interpolan, el porcentaje de alícuotas que supera los criterios de aceptación establecidos para el SAR, también varían, si bien, mediante el método LBG estos porcentajes se sitúan generalmente por encima del 50%, a excepción de la muestra TAL, con un 43.8%. Esta última muestra presenta un porcentaje de aceptación del 38.6% empleando el método EBG. El resto, presenta valores por encima del 50%. Por último, así como el número de alícuotas que no supera el test de recuperación es de cero, la proporción de alícuotas que no supera el test de reciclaje varía entre 0 y un 20% al emplear el método LBG, si bien, al emplear el método EBG estas proporciones están por encima del 25% e incluso llegando al 50%, como es el caso de la muestra Xalfas, reduciendo considerablemente el número de estimaciones individuales incluidas en los modelos de estimación de la  $De$ .

#### 8.2.3.1. Estimación de la $De$ para la señal OSL de la serie eólica.

La distribución de los datos para la muestra CAF1 (Cíes-Alto da Figueira) se representa en la figura (Fig. 8.16.1), empleando el método LBG y EBG. Para ambos se observa un buen ajuste a una normal, aunque para el método LBG, se observa una mayor dispersión y un mayor porcentaje de error relativo asociado, entre el 4 y el 25%. Para el método EBG, además de presentar un error asociado entre el 2 y el 20%, el porcentaje de  $OD$  obtenido a partir de 24 alícuotas cae a valores por debajo del 5%. En ambos casos, el modelo CAM cuenta con un elevado número de alícuotas incluidas en el i.c. del 95%, con una  $De$  de  $80 \pm 3$ (Gy) para el modelo  $CAM_{LBG}$  y de  $62 \pm 2$ (Gy) para el modelo  $CAM_{EBG}$  y que suponen un rango de edad de  $30 \pm 4$ (ka) y  $23 \pm 3$ (ka), respectivamente como se describe en la tabla (Tabla 64).

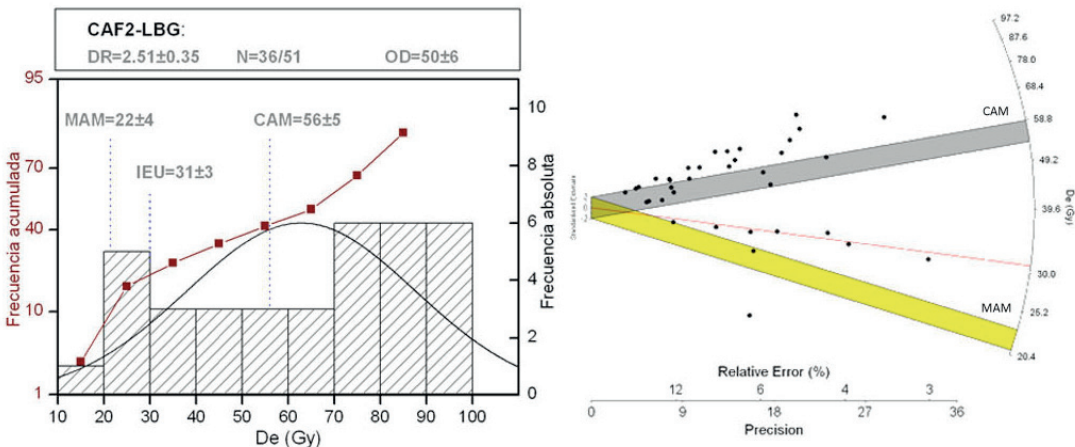


**Figura 8.16.1.** Gráficos de distribución para la muestra CAF1 (Cies-Alto da Figueira), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda azul para el MAM-LBG y una banda amarilla para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

**Tabla 64.** Rango de edad calculado para la muestra CAF1 (Cies-Alto da Figueira), a partir de las estimaciones de la  $De$  obtenidas con cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU mediante los métodos LBG y EBG.

Muestras (señal)	Edad CAM (ka)	Edad MAM (ka)	Edad IEU (ka)
CAF1-LBG (OSL) (Cies-Alto da Figueira)	$30,66 \pm 4,85$	$18,18 \pm 2,92$	$28,31 \pm 4,61$
CAF1-EBG (OSL) (Cies-Alto da Figueira)	$23,49 \pm 3,64$	$20,97 \pm 4,12$	$23,01 \pm 3,56$

En la figura (Fig. 8.16.2) se representan el histograma y el gráfico radial para las estimaciones individuales obtenidas de la muestra CAF2 (Cíes-Alto da Figueira) a partir de 36 alícuotas y empleando el método LBG. En ambos gráficos se puede observar una dispersión muy amplia y en el histograma poco ajuste a una normal, si bien, el porcentaje de error relativo si sitúa entre un 3% y un 15%, incluyéndose un reducido número de alícuotas dentro del i.c. del 95% para el modelo CAM (franja gris en la misma figura) con un error inferior al 10% y cuya  $De$  estimada es de  $56 \pm 5$  (Gy), siendo un total de 7 alícuotas las que se ajustan al modelo IEU (línea roja Fig. 8.16.2), cuya estimación es de  $31 \pm 3$  (Gy). Estas estimaciones se traducen en rangos de edad de  $22 \pm 4$  (ka) para el modelo CAM y de  $12 \pm 2$  (ka) para el modelo IEU, como se describe en la tabla (Tabla 65).



**Figura 8.16.2.** Gráficos de distribución para la muestra CAF2 (Cíes-Alto da Figueira), empleando el método LBG. En el histograma se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU; en el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En el gráfico radial se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM y una banda amarilla para el modelo MAM. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

**Tabla 65.** Rango de edad calculado para la muestra CAF2 (Cíes-Alto da Figueira), a partir de las estimaciones de la  $De$  obtenidas con cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU mediante el método LBG.

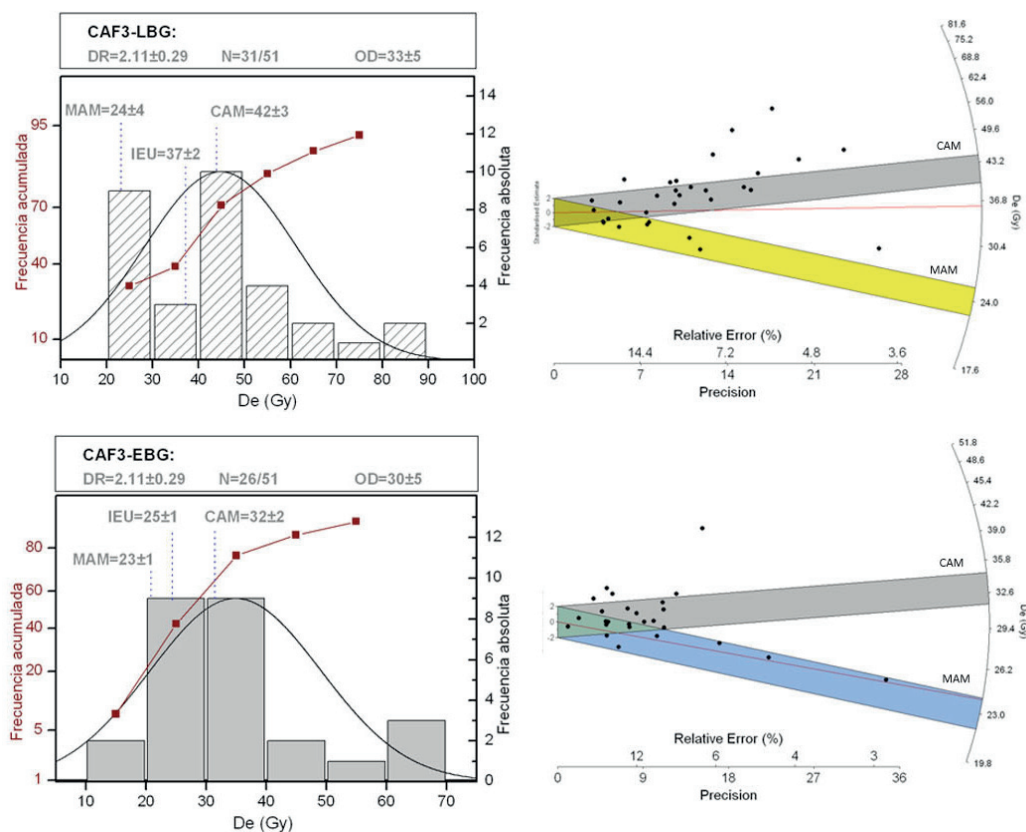
Muestra (señal)	Edad CAM (ka)	Edad MAM (ka)	Edad IEU (ka)
CAF2-LBG (OSL) (Cíes-Alto da Figueira)	$22,31 \pm 3,92$	$8,98 \pm 2,30$	$12,53 \pm 2,28$

Respecto a la muestra CAF3 (Cíes-Alto da Figueira), la distribución de las dosis obtenidas para cada uno de los modelos y métodos de integración de la señal OSL se representa en la figura (Fig. 8.16.3), en la que se puede observar un buen ajuste a una distribución normal y un porcentaje de error relativo entre el 3% y el 15%, si bien, el número de alícuotas dentro del i.c. del 95% para el modelo  $CAM_{LBG}$  con un error por debajo del 10% no es superior a 10, estimándose una  $De$  de  $42 \pm 3$  (Gy) y un porcentaje de  $OD_{LBG}$  del  $33 \pm 5\%$ . Mediante el modelo  $CAM_{EBG}$ , con un menor número de alícuotas dentro del mismo intervalo, la  $De$  es de  $32 \pm 2$  (Gy) y una  $OD_{EBG}$  del  $30 \pm 5\%$ .

En la tabla (Tabla 66) se describen los rangos de edad para cada uno de los modelos siendo, para  $CAMLBG$  y  $CAMEBG$ , de  $20 \pm 3$  (ka) y de  $15 \pm 2$  (ka) respectivamente.

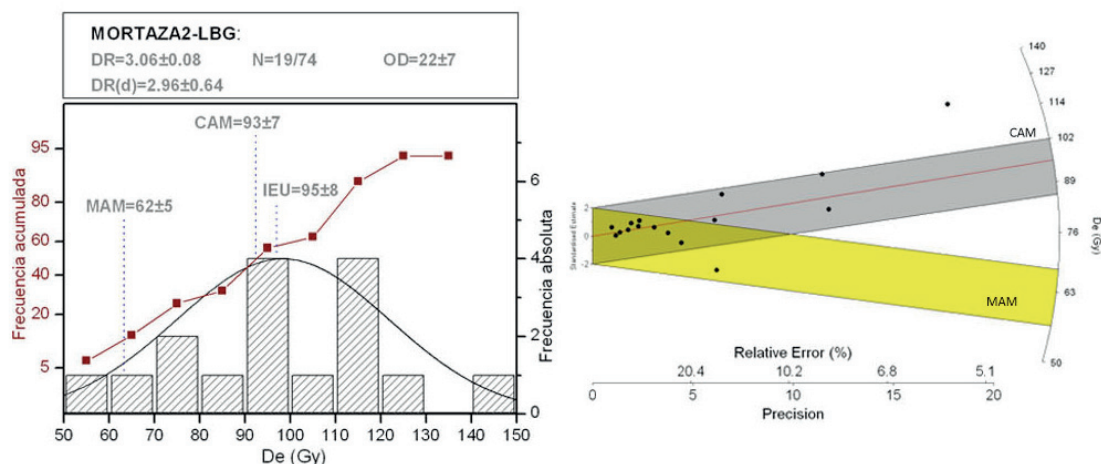
**Tabla 66.** Rango de edad calculado para la muestra CAF3 (Cíes-Alto da Figueira) a partir de las estimaciones de la  $De$  obtenidas con cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU mediante los métodos LBG y EBG.

Muestras (señal)	Edad CAM (ka)	Edad MAM (ka)	Edad IEU (ka)
CAF3-LBG (OSL) (Cíes-Alto da Figueira)	$20,10 \pm 3,36$	$11,54 \pm 2,52$	$17,49 \pm 2,96$
CAF3-EBG (OSL) (Cíes-Alto da Figueira)	$15,50 \pm 2,63$	$11,21 \pm 1,74$	$11,74 \pm 1,86$



**Figura 8.16.3.** Gráficos de distribución para la muestra CAF3 (Cies-Alto da Figueira), empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU. En el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y-izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda amarilla para el MAM-LBG y una banda azul para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

En la figura (Fig. 8.16.4) se representan los gráficos de distribución de la muestra de Punta Mortaza (Mortaza2) para la cual se observa una distribución que, aun contando con un reducido número de alícuotas (19 de un 74) presenta un buen ajuste a una normal, poca asimetría y una reducida sobre-dispersión ( $22\pm 7\%$ ), aunque un porcentaje de error elevado, con sólo dos alícuotas dentro del i.c.95% con un error inferior al 10%.



**Figura 8.16.4.** Gráficos de distribución para la muestra Mortaza2 de la señal obtenida mediante el método (LBG). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU. En el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka) asumiendo equilibrio y la DR(d) asumiendo desequilibrio, el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM-LBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

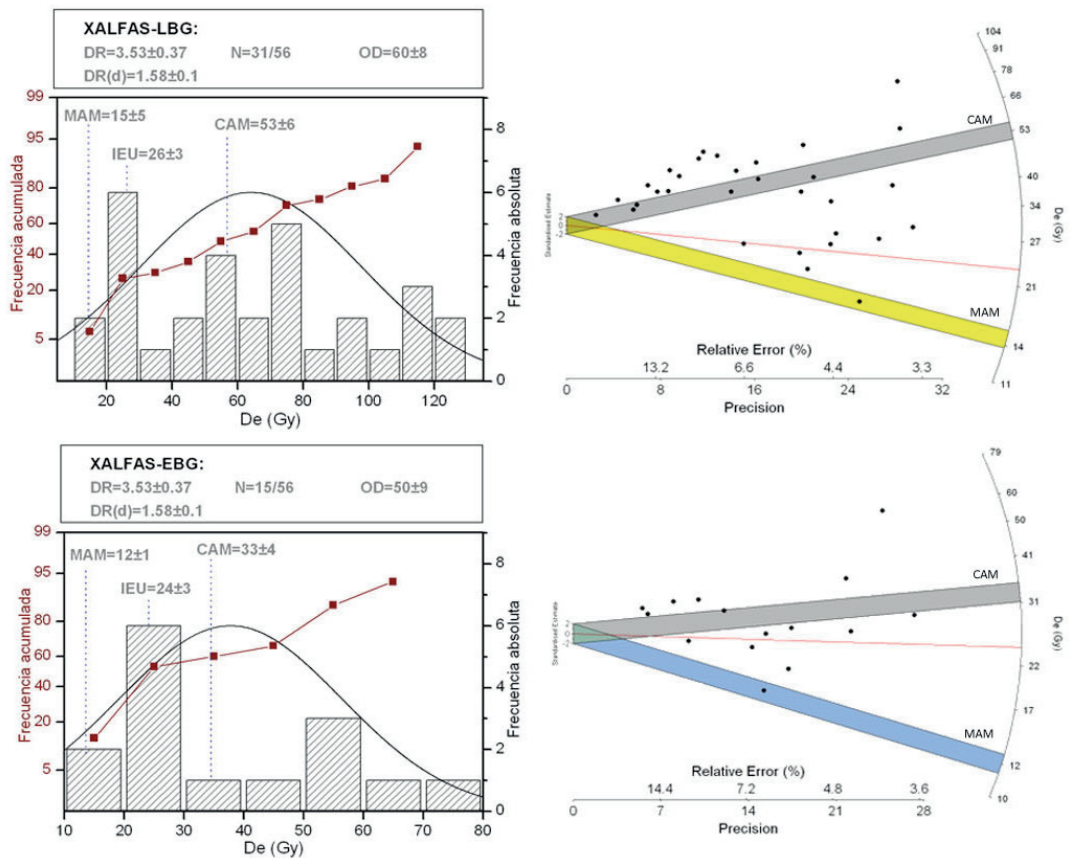
La  $De$  estimada para la muestra Mortaza2 mediante el modelo CAM<sub>LBG</sub> es de  $93\pm7$ (Gy) lo que significa una edad similar de  $28\pm4$ (ka) (Tabla 67). Para esta última muestra no se obtienen estimaciones individuales suficientes mediante el método EBG.

**Tabla 67.** Rango de edad calculado para la muestra de Punta Mortaza (Mortaza2) a partir de las estimaciones de la  $De$  obtenidas con cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU mediante los métodos LBG y EBG.

Muestras (señal)	Edad CAM (ka)	Edad MAM (ka)	Edad IEU (ka)
<b>Mortaza2- LBG (OSL) (Punta Mortaza)</b>	$28,71 \pm 4,81$	$19,15 \pm 3,43$	$29,33 \pm 4,89$

La distribución de la muestra Xalfas se caracteriza por una amplia dispersión y un elevado porcentaje de OD tanto para LBG como para EBG, con un error relativo entre el 3% y el 15% (Fig. 8.16.5). La  $De$  estimada mediante el modelo CAM<sub>LBG</sub>, a partir de 31 alícuotas es de  $53\pm6$ (Gy) y un rango de edad de  $22\pm6$ (ka). Para CAM<sub>EBG</sub>, a partir de 15 alícuotas la  $De$  es de  $33\pm4$ (Gy) y una edad de  $14\pm4$ (ka) (Tabla 68).



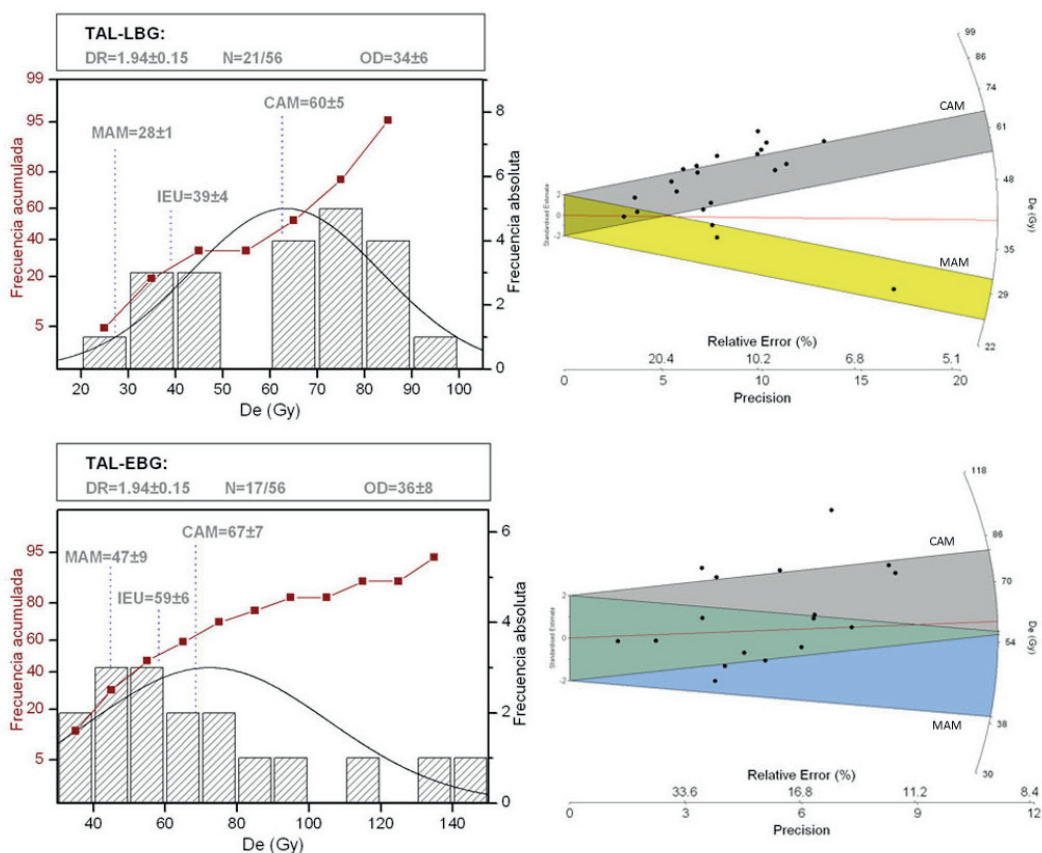


**Figura 8.16.5.** Gráficos de distribución para la muestra Xalfas, empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la *De* (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la *De* (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU. En el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka) asumiendo equilibrio y la DR(d) asumiendo desequilibrio, el número de alicuotas empleado para la estimación del total analizado (N), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la *De* (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda amarilla para el MAM-LBG y una banda azul para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

**Tabla 68.** Rango de edad calculado para la muestra Xalfas a partir de las estimaciones de la *De* obtenidas con cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU mediante los métodos LBG y EBG.

Muestras (señal)	Edad CAM (ka)	Edad MAM (ka)	Edad IEU (ka)
Xalfas-LBG (OSL)	22,91 ± 6,49	6,37 ± 1,80	11,43 ± 3,23
Xalfas-EBG (OSL)	14,11 ± 3,99	5,19 ± 1,47	10,31 ± 2,92

Las distribuciones observadas para la muestra TAL (Fig. 8.16.6) presentan también una amplia dispersión y una OD en torno al 35%, para ambos métodos de integración. No obstante, mediante el método LBG los datos se ajustan mejor a una normal y el error asociado oscila entre el 5 y el 22%, mientras que, mediante el método EBG se observa asimetría hacia valores de dosis menores y un incremento del error relativo, entre el 10 y el 35%.



**Figura 8.16.6.** Gráficos de distribución para la muestra TAL, empleando los métodos LBG (arriba) y EBG (abajo). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) obtenidas al aplicar los modelos CAM, MAM e IEU. En el recuadro superior se indican la  $DR$  (Gy/ka), el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado ( $N$ ), y el porcentaje de OD. En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con los i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris para el modelo CAM, una banda amarilla para el MAM-LBG y una banda azul para el modelo MAM-EBG. La línea roja coincide con la estimación realizada mediante el modelo IEU.

No obstante, la *De* estimada mediante el modelo CAM, tanto para LBG como para EBG, presenta valores similares, de  $60\pm5(\text{Gy})$  y  $67\pm7(\text{Gy})$ , a partir de 21 y 17 alícuotas respectivamente. El rango de edad calculado para cada modelo es de  $31\pm3(\text{ka})$  y  $35\pm4(\text{ka})$  (Tabla 69).

**Tabla 69.** Rango de edad calculado para la muestra TAL a partir de las estimaciones de la *De* obtenidas con cada uno de los modelos CAM, MAM e IEU mediante los métodos LBG y EBG.

Muestras (señal)	Edad CAM (ka)	Edad MAM (ka)	Edad IEU (ka)
TAL – LBG (OSL)	$30,98 \pm 3,66$	$14,46 \pm 1,41$	$20,51 \pm 2,91$
TAL – EBG (OSL)	$34,92 \pm 4,57$	$24,39 \pm 5,93$	$30,50 \pm 4,02$

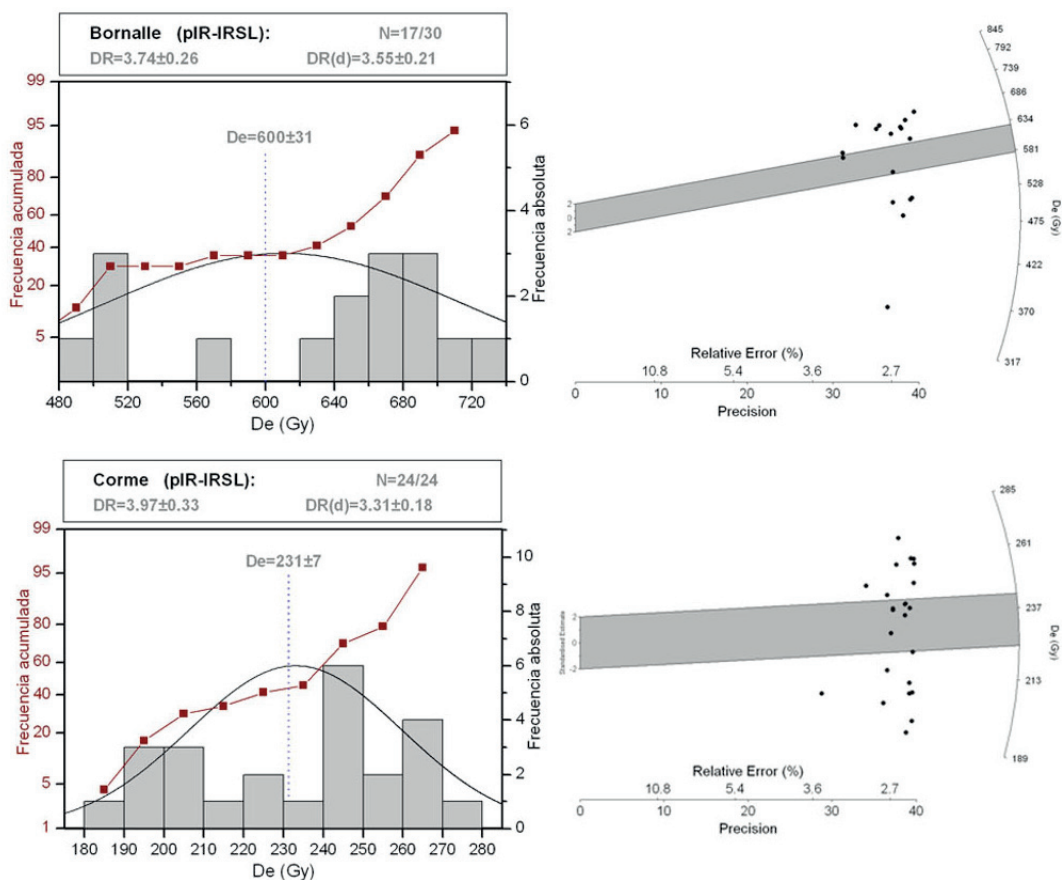
8.2.11.2. Estimación de la *De* para la señal pIR-IRSL.

Las muestras de la serie eólica a partir de las cuales se ha extraído la señal pIR-IRSL mediante el método LBG se caracterizan, en general, por distribuciones muy dispersas y un error inferior al 5%. En la figura (Fig. 8.16.7) se representa la distribución de las muestras Bornalle y Corme, a partir de 17 alícuotas (56%) para la primera, y 24 alícuotas (100%), para la segunda, la cual, además, presenta un mejor ajuste a una normal.

La estimación de la *De* para la muestra Bornalle empleando la media ponderada es de  $600\pm31(\text{Gy})$  y para la muestra Corme de  $231\pm7(\text{Gy})$ , calculándose una edad de  $165\pm9(\text{ka})$  y  $62\pm3(\text{ka})$ , respectivamente (Tabla 70).

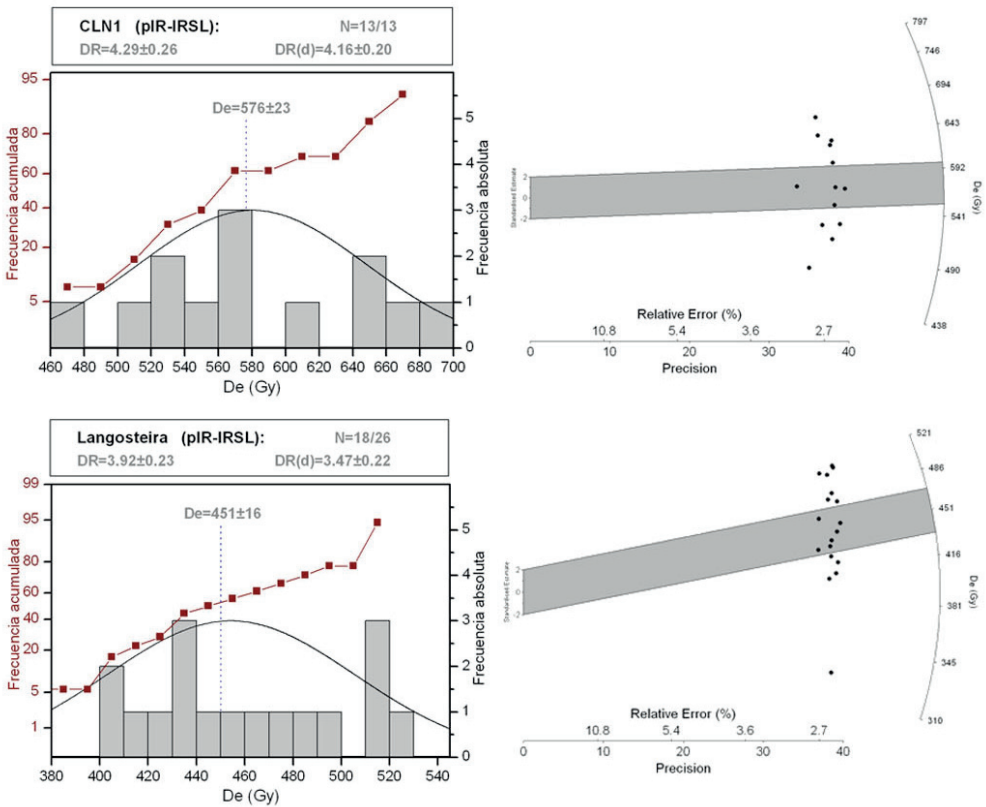
**Tabla 70.** Rango de edad calculado para las muestras Bornalle y Corme a partir de las estimaciones de la *De* obtenidas con el modelo CAM empleando el método LBG.

Muestras (señal)	Bornalle ( <i>pIR-IRSL</i> )	Corme ( <i>pIR-IRSL</i> )
Edad: Media ponderada	$164,98 \pm 9,76 \text{ ka}$	$62,17 \pm 3,79 \text{ ka}$



**Figura 8.16.7.** Gráficos de distribución para las muestras Bornalle (arriba-izq.) y Corme (abajo-izq.). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) calculando la media ponderada. En el recuadro superior se indican la  $DR$  (Gy/ka) asumiendo equilibrio y la  $DR(d)$  asumiendo desequilibrio y el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N). En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la estimación de la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con su i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris.

En la figura (Fig. 8.16.8) se representa la distribución de los datos para las muestras de Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) y de Punta Langosteira (Langosteira), de las cuales se ha extraído la señal pIR-IRSL y, como se comentó anteriormente, presentan una dispersión amplia y un error relativo asociado por debajo del 5%. La muestra CLN1 presenta un mejor ajuste a una normal que Langosteira, si bien, el número de alícuotas es más reducido, con 13 para la primera (el 100%) y 18 para la segunda (un 70%).



**Figura 8.16.8.** Gráficos de distribución para las muestras de Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1; arriba-izq.) y Langosteira (abajo-izq.). En los histogramas se representa la frecuencia absoluta (eje Y-derecha) de las estimaciones de la  $De$  (Gy) con la línea de distribución normal, así como la línea de frecuencia acumulada (eje Y-izquierda). También se incluyen las estimaciones de la  $De$  (Gy) calculando la media ponderada. En el recuadro superior se indican la DR (Gy/ka) asumiendo equilibrio y la DR(d) asumiendo disequilibrio y, el número de alícuotas empleado para la estimación del total analizado (N). En los gráficos radiales se representa el porcentaje de error relativo y la precisión (eje X), la estimación de la  $De$  (Gy) (eje Y radial) y un estimador central (eje Y- izquierda) con su i.c. 95% ( $\pm 2\sigma$ ) representados mediante una banda gris.

La estimación de la  $De$  mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  es de  $576 \pm 23$  (Gy) para la muestra de Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) y de  $451 \pm 16$  (Gy) para la muestra Langosteira, con un rango de edad de  $122 \pm 6$  (ka) y  $131 \pm 6$  (ka) respectivamente (Tabla 71).

**Tabla 71.** Rango de edad calculado para las muestras Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) y de Punta Langosteira (Langosteira) a partir de las estimaciones de la  $De$  obtenidas con el modelo CAM empleando el método LBG.

Muestras (señal)	CLN1 (pIR-IRSL) (Cíes-Lagoa dos Nenos)	Langosteira (pIR-IRSL) (Punta Langosteira)
Edad: Media ponderada	121,96 ± 6,19 ka	131,35 ± 6,88 ka

Capítulo 9.

Discusión.



## 9. Discusión.

Uno de los principales problemas del estudio de la Geología del Cenozoico en Galicia donde predominan las rocas félsicas es la litología de los depósitos sedimentarios derivados de la destrucción de estas rocas. Son los llamados depósitos siliciclásticos, sedimentos no carbonáceos a base de sílicio, formados por la destrucción de rocas preexistentes, transportados a otro lugar y redepositados para formar un sedimento y ulteriormente una roca. Algunos ejemplos de este tipo de rocas sedimentarias son los conglomerados, arenisca, limolita y lutita. En Galicia, con la excepción de los sedimentos asociados a medios cársticos, la mayor parte de los sedimentos cenozoicos son del tipo siliciclástico, lo que combinado con la escasez de restos orgánicos fósiles ha dificultado enormemente el estudio del Cenozoico en Galicia. Puede decirse que desde el final del Mioceno hasta el inicio del Cuaternario, y con la excepción de los depósitos lacustres limitados a algunas de las cuencas terciarias gallegas (Nonn, 1966; Baltuille et al., 1992; López-Martínez et al., 1993; Barrón y Santos-Fidalgo, 1997; Ferrús, 1998), apenas hay datos de sedimentos a los que se pueda asignar alguna edad absoluta obtenida a partir de isótopos radioactivos o de cosmogénicos terrestres, y el intervalo de tiempo representado apenas supera el límite de los 550.000 años antes de ahora (Railsback et al. 2017). El propósito principal de este trabajo de Tesis es el de poner a prueba la utilidad de un método de datación de sedimentos siliciclásticos, los más frecuentes en Galicia, y que hasta hace pocos años (Viveen et al., 2012; Viveen 2013) apenas se habían tenido en cuenta tal vez debido a los grandes problemas que provoca la abundancia de isótopos radioactivos en las rocas graníticas y los sedimentos siliciclásticos derivados, y que causan la saturación de la señal de luminiscencia del cuarzo en pocos miles de años.

Este trabajo de Tesis no debe ser considerado como un estudio geológico tradicional que se aplica a un entorno geográfico o geológico determinado en el espacio y en el tiempo. Es, más bien, un trabajo metodológico en que se ha aplicado las técnicas de medida de la señal OSL o pIR-IRSL a distintos tipos de sedimentos siliciclásticos asociados a ambientes eólicos, fluviales o costeros (playas de cantos y playas de arena). El rango de edades aún siendo muy reducido permite reconstruir, por primera vez con tal grado de detalle, la evolución de Galicia durante los últimos 300.000 años, aproximadamente. Igualmente la experiencia adquirida con el análisis de este tipo de sedimentos se ha demostrado de gran utilidad para abordar con esta técnica de datación otro tipo de ambientes sedimentarios no considerados en este trabajo de Tesis por razones de oportunidad o limitaciones de tiempo. La selección de los puntos de muestreo se ha realizado utilizando el conocimiento previo del terreno existente en anteriores trabajos geológicos que por razones obvias no habían sido situados en el tiempo más que aproximadamente. Quizás el ejemplo mas evidente sea la datación de la serie de depósitos fluviales de la red de drenaje del río Mero (Coruña), que hasta el momento de nuestro trabajo se consideraban, utilizando como único criterio su color rojizo, como sedimentos correspondientes al Villafranchense, piso de transición entre el Plioceno y el Cuaternario aunque hoy se considera la base del Cuaternario (Nonn, 1966). Durante muchos años este criterio ha sido el utilizado para



asignar una edad villafranquiense a cualquier sedimento con tonalidad rojiza, aunque gracias a este trabajo de Tesis se ha probado que en la mayor parte de los casos se trata de sedimentos de edad mucho más reciente, con los consiguientes efectos colaterales en cuanto la comprensión de la evolución del relieve durante el Cuaternario en Galicia. En el caso de la Cuenca del Mero ha permitido probar la edad de formación de la Ría de Coruña que ahora se considera formada hace menos de 5 millones de años.

Para obtener la edad de enterramiento de los sedimentos a partir de la señal OSL o pIR-IRSL, dentro del límite que permite la técnica (Aitken, 1990; Aitken 1998; Rhodes, 2011; Sanjurjo-Sánchez, et al., 2011; Sanjurjo-Sánchez, et al., 2013), es imprescindible conocer la tasa de radiación natural del medio (*DR*) así como obtener una estimación de la dosis equivalente (*De*) para cada muestra. Además, como se ha comentado también en la Introducción y a diferencia de lo que ocurre con los depósitos eólicos, la aplicación de esta técnica en depósitos fluviales puede presentar inconvenientes como la presencia de distribuciones muy amplias y asimétricas debidas al fenómeno de blanqueamiento incompleto de la señal OSL (Ref.: Duller, 1994; Murray et al., 1995; Olley et al., 1999; Stokes, 2001; Wallinga, 2002a; Rittenour et al., 2008; Przegietka et al., 2013), que no imposibilitan la aplicación de la técnica siempre y cuando exista una población de granos bien blanqueados (Fuller, 1998; Murray, 1995; Olley, 1998; Colls, 2001; Murray y Olley, 2002; Rittenour, 2008; Rhodes, 2011). Esta señal residual o heredada, debido al blanqueamiento parcial de algunos de los granos de cuarzo o feldespato, se asocia, entre otros aspectos, a transporte masivo de materiales y turbidez (Duller, 2008), variando en función del tamaño de grano (Bishop et al., 2011), y cuyo análisis puede llegar a aportar información sobre los mecanismos implicados en la movilización de sedimentos en distintos medios, como el fluvial, (Muñoz-Salinas et al., 2017). Es por ello por lo que resulta aconsejable examinar la distribución de las estimaciones obtenidas a partir de alícuotas multigrano, considerando cualquier factor que pueda afectar a las estimaciones de la *De*.

Para OSL y de forma generalizada para distribuciones de tipo normal, simétricas y centradas alrededor de un valor promedio, se aceptan estimaciones de sobre-dispersión (*OD*) con porcentajes inferiores al 20% y el 30% (Olley, 2004; Arnold and Roberts, 2009; Murray et al.; 2012) y que justificarían el uso del modelo de edad central CAM. No obstante, cuando el porcentaje de *OD* estimada supera estos valores de referencia, la aplicación del modelo CAM puede resultar inadecuada empleándose modelos de estimación de la *De* como el MAM o el IEU, entre otros, desarrollados para distribuciones en las cuales se detecta la presencia de una población de granos bien blanqueados y otra con blanqueamiento incompleto y carga residual como es el caso, entre otros, de los estudios realizados en paleo-crecidas por Medialdea (2013) o más recientemente, en depósitos fluvio-glaciares (Bickel et al.; 2015; Hardt et al., 2016), e incluso para IRSL aplicando el modelo CAM y MAM para las estimaciones obtenidas a partir del protocolo SAR modificado para feldespatos (Trauerstein et al., 2014) en función del porcentaje de *OD* estimado. Así, la selección del modelo más adecuado para cada caso pasa por el análisis de la distribución y la comprensión de aquellos factores que pueden causar un

incremento de la dispersión, tanto para sedimentos relativamente antiguos (>100ka) expuestos a radiación natural durante periodos de tiempo suficientemente extensos como para presentar una señal OSL próxima a los niveles de saturación (Wintle and Murray, 2006), como para sedimentos recientes (de unos pocos miles de años), en donde la existencia de una señal OSL residual puede generar una sobre-estimación de la *De* que derivaría en un rango de edad superior al tiempo de enterramiento real si ésta no se detecta y se corrige (Olley, 1999). Así, para el conjunto de depósitos fluviales-costeros conformado por las muestras MPK y ABC se discutirá cada uno de estos aspectos de manera independiente y en detalle, teniendo además en cuenta, factores extrínsecos como la variabilidad en la microdosimetría y el grado de heterogeneidad de la radiación beta en el sedimento, como fuente de sobredispersión.

Respecto a las dataciones realizadas mediante OSL y pIR-IRSL para serie eólica, la aplicación de luminiscencia OSL, TL e IRSL para sedimentos de tipo eólico se ha empleado con éxito en un amplio número de trabajos, a partir de los primeros estudios realizados (p. ej.: Huntley et al., 1985a) y existiendo una recopilación muy amplia al respecto publicada por Jacobs (2008), lo que permite establecer la adecuación de la técnica para este tipo de sedimentos. Así, los inconvenientes asociados al fenómeno de blanqueamiento incompleto de la señal OSL (o IRSL) durante el proceso de transporte eólico en dunas no suelen ser significativos -no así en otros materiales eólicos como loess, más problemáticos- (Olley, 2004b; Duller, 2004; Olley, 2006), por lo que un hipotético incremento de la dispersión vendría asociado a fenómenos extrínsecos como heterogeneidad en la microdosimetría beta o algún tipo de desequilibrio en la tasa de radiación natural terrestre (*DR*) relacionado con el alto grado de compactación de estos depósitos y su comportamiento como un sistema semi-cerrado, o bien a aspectos intrínsecos relacionados con los propios materiales que conforman las muestras, con la metodología utilizada o con los instrumentos de medida empleados (Thomsen, 2003). Es por ello por lo que se discutirán aspectos como la tasa de radiación anual, intensidad de la señal OSL y pIR-IRSL, error asociado y sensibilidad, etcétera, de forma conjunta, si bien, la estimación de la *De* a partir del modelo más fiable y el rango de edad calculado se analizará de manera individualizada para cada una de las muestras.

#### 9.1. Tasa de radiación natural, señal OSL y rango de edad para los depósitos fluviales (muestras MPK y ABC).

Como se ha comentado en los antecedentes, los sistemas de terrazas que se desarrollan a lo largo de la costa gallega, fueron ubicados hace más de 1 millón de años (Nonn, 1966). También se ha hecho referencia a algunas dataciones absolutas, mediante Nucleidos Cosmogénicos Terrestres (TCN), principalmente, de algunos de los sistemas de terrazas presentes en el curso bajo del sistema fluvial Miño-Sil (Lomertzen, 2011; Viveen et al., 2012; 2014; Viveen, 2013), sin que existan, hasta el presente, dataciones comparables a las realizadas en este trabajo de Tesis, al menos en el NO de España. Así, se discutirán, en este apartado, los distintos aspectos relacionados con las dataciones OSL, como la tasa de radiación natural o la señal OSL, entre otros,

comparándolos con datos sedimentológicos y aspectos geomorfológicos que permitan obtener un modelo cronológico coherente.

#### 9.1.1. Tasa de radiación natural del medio ( $DR$ ).

La tasa de radiación anual ( $DR_{TOTAL}$ ) depende, en gran medida, de la litología de la cual proceden los materiales que conforman las muestras. Así, los materiales procedentes de granitos suelen presentar tasas más elevadas si se comparan, por ejemplo, con las obtenidas en materiales procedentes de esquistos (Gascoyne, 1992; Boyle, 1982), debido a una mayor concentración de isótopos radiactivos como los de uranio, torio y potasio, presentes en minerales como feldespato potásico, micas o circones. Así, los valores de fondo globales para la radiación terrestre natural (en condiciones ambientales actuales y sin influencia humana) generada por la desintegración del  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  y las cadenas de desintegración de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  se ubican dentro del rango que va de 0.23 a 22.9 (Gy/ka), aunque existen zonas puntuales mucho más radiactivas (CSN, 2000). En el caso de Galicia y Norte de Portugal, áreas de litología similar, así como en el margen atlántico de la Península Ibérica y algunas zonas del interior, la tasa de radiación también varía de forma significativa en función, principalmente, de la litología. Por ejemplo, y solo respecto a la radiación gamma ( $DR_{GAMMA}$ ) medida en superficie en el Proyecto Marna del Consejo de Seguridad Nuclear de España (CSN, 2000), las zona central y sur de la franja mediterránea ibérica, presenta valores de 0.34-0.38(Gy/ka), mientras que en el centro-norte y noroeste se superan los valores de 0.76 (Gy/ka), llegando hasta 1.3 (Gy/ka) en la Provincia de Pontevedra, 1.1 (Gy/ka) en Ourense, 1.03 (Gy/ka) en Lugo y 0.83 (Gy/ka) en A Coruña, estableciéndose un rango para la componente gamma ( $DR_{GAMMA}$ ) en Galicia entre 0.8 y 1.3 (Gy/ka) (Tabla 72). Conviene señalar que este tipo de mediciones se ha realizado a 1m de altura y, por lo tanto, los valores obtenidos serán inferiores a aquellos cuyas medidas se han realizado directamente en superficie.

En la misma tabla se describen, además, valores de referencia para la  $DR_{TOTAL}$  extraídos de algunos de los trabajos realizados en zonas próximas y/o con materiales de origen fluvial, como es el caso de los estudios en los ríos Miño, Tajo y Duero en el noroeste peninsular, debido a las similitudes en la litología de ambas zonas y la de las cuencas estudiadas en el presente trabajo. Así, los estudios realizados en el sistema de terrazas del Bajo Miño (Viveen, 2013) conformados por gravas sobre granito alterado, la  $DR$  oscila entre 3.4 y 5.4 (Gy/ka). En los estudios realizados en los cursos medio y bajo del río Tajo (Cunha et al., 2008; Martins et al., 2010) en sedimentos desarrollados a partir de granito y gneis, la  $DR$  oscila entre 3.4 y 6.2 (Gy/ka). En el curso medio del Río Duero (Medialdea, 2013) el análisis de los sedimentos desarrollados principalmente sobre granito y esquisto, la  $DR$  oscila entre 4.1 y 4.5 (Gy/ka). En el curso medio-bajo del río Mondego, cuenca situada entre el Duero y el Tajo, que atraviesa una litología principalmente granítica, aunque con presencia de esquistos, margas, calizas y areniscas próximas a su desembocadura en la costa central portuguesa, se obtienen tasa

entre 1.2 y 3.3 (Gy/ka) al estimar la  $D_e$  mediante OSL y entre 2.0 y 6.0 (Gy/ka) para la señal IRSL (Ramos et al., 2012).

De forma generalizada, en cuencas que drenan áreas conformadas por una litología granítica, el uso de esta técnica de datación está condicionada por una elevada probabilidad de alcanzar niveles de saturación de la señal OSL en periodos de tiempo más breves de lo esperado, debido a la elevada tasa de radiación ( $DR$ ) existente, situándose el límite máximo de edad en unas pocas decenas de miles de años (Sanjurjo-Sánchez y Vidal-Romani, 2011). No obstante, como se puede observar en la misma tabla (Tabla 72) y en base a los resultados obtenidos para las muestras del río Mero (MPK), los valores de la  $DR_{TOTAL}$  son muy inferiores si se compara con aquellos que se estiman en los estudios citados. Esto se debe, principalmente, a que los materiales depositados en la cuenca del río Mero y península de Sada se desarrollan principalmente sobre esquistos, muy alterados en superficie, y en donde los materiales derivados han sufrido un intenso lavado de los elementos radiactivos como prueban las bajas proporciones de potasio analizadas (Tabla 17) o el análisis granulométrico, sobre todo para la muestra de Cecebre (MPK6), con una pauta similar al resto de muestras desarrolladas sobre este tipo de litología a lo largo de la cuenca del río Mero, pero presentando un alto lavado de las fracciones más finas (Tabla 18 y Fig. 8.8.6). Por su parte, la muestra de Vilaboa (MPK8), desarrollada en un área granítica de la misma cuenca, presenta unos valores estimados de  $1.64 \pm 0.16$  (Gy/ka), por debajo de los  $1.83 \pm 0.14$  (Gy/ka) que presenta la muestra MPK2 (Sta. Cruz). No existen, por tanto, diferencias en la  $DR$  entre los materiales desarrollados a partir de esquistos y granito para las muestras del río Mero.

Como se ha comentado en los principios de luminiscencia, la señal OSL del cuarzo alcanza un umbral de saturación antes que la señal IRSL de los feldespatos, para una misma dosis. Sin embargo, la señal pIR-IRSL analizada a partir de grano grueso y a partir de la fracción fina de las muestras de Bribes (MPK1), Mera (MPK4) o Cecebre (MPK6), presenta un elevado grado de saturación que imposibilita la obtención de un rango de edad fiable (Fig. 8.10.15 y 8.10.16), sin poder concretar, a falta de análisis, si estos niveles de saturación se deben a la contribución de una carga residual por blanqueamiento incompleto, ya que los feldespatos requieren un mayor tiempo de exposición a la luz solar para blanquear su señal IRSL por completo (Godfrey-Smith et al., 1988; Trauestein et al., 2014).

Por su parte, los valores de la  $DR_{TOTAL}$  para las muestras de Catoira (ABC), entre 0.72 y 1.97 Gy/ka, presentan también valores asociados a una baja actividad si bien, el río Ulla drena una cuenca muy extensa conformada por materiales de naturaleza muy diversa, como se comentó en la descripción de la zona (ver apartado 2.3. y figuras 2.10 y 2.11).

**Tabla 72.** Valores de DR para distintos sedimentos fluviales y eólicos, incluyendo el rango de valores máximos y mínimos para la tasa de radiación natural del medio ( $DR_{TOTAL}$ ) y la componente gamma ( $DR_{GAMMA}$ ) en Gy/ka, obtenidos en los distintos estudios realizados en el noroeste de la Península Ibérica.

Localización	$DR_{TOTAL}$ (Gy/ka) y Señal de Luminiscencia	Tipo de depósitos y Litología	Autores
Bajo Miño	3.4 - 5.4 (OSL; IRSL)	Depósitos Fluviales (granitos )	Viveen et al., 2013
Bajo Tajo	3.4 - 6.2 (OSL; IRSL)	Depósitos Fluviales (granitos y gneiss)	Martins et al. 2010
Bajo Tajo	2.8 - 7.0 (OSL; IRSL)	Depósitos Fluviales (granitos y gneiss)	Cunha et al., 2008
Duero Medio	4.1 - 4.5 (OSL)	Depósitos Fluviales (granitos y esquistos)	Medialdea, 2013
Río Mondego	1.2 - 3.3 (OSL) 2.0 – 6.0 (IRSL)	Depósitos Fluviales (granitos y gneiss)	Ramos et al., 2012
Cuenca del Mero	0.68 – 1.83 (OSL)	Depósitos Fluviales (esquistos y granitos)	Presente trabajo
Río Ulla- Catoira	0.72 – 1.97 (OSL)	Depósitos Fluviales (granitos y otros)	Presente trabajo
Río Miño	2.5 – 4.2 (OSL)	Depósitos fluvio-lacustres (granitos)	Viveen et al., 2014
Localización	$DR_{TOTAL}$ (Gy/ka)	Materiales	Autores
Serie Eólica	1.59 – 3.60 (OSL)	Depósitos eólicos	Presente trabajo
Serie Eólica	3.32-4.17 (IRSL)	Depósitos eólicos	Presente trabajo
Localización	$DR_{GAMMA}$ (Gy/ka)	Materiales	Autores
Galicia	0.83 – 1.3 (*)	(Estudio genérico)	CSN, 2000
Cuenca del Mero	0.13 – 1.3	Depósitos Fluviales (esquistos y granitos)	Presente trabajo
Río Ulla	0.3 – 1.0	Depósitos Fluviales (granitos y otros)	Presente trabajo
Serie Eólica	0.76-1.80 (OSL)	Depósitos eólicos	Presente trabajo

(\*) Proyecto MARNA: mediciones realizadas a 1m de la superficie del suelo.

## 9.1.1.1. Equilibrio secular y disequilibrio radiactivo para las muestras MPK y ABC.

Cuando se compara la actividad estimada incluyendo el error asociado de los grupos de equilibrio de las cadenas de desintegración de  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  (esto es, comparar la actividad de los isótopos  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{226}\text{Rn} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$  para la primera, y de  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{228}\text{Th}$  para la segunda) (Olley, 1996), no se observa disequilibrio secular en la tasa de radiación natural terrestre, al mantenerse, de forma generalizada, las proporciones entre los mismos (Tabla 5). La única excepción la presenta, para la cadena de  $^{238}\text{U}$  la muestra MPK6 (Cecebre), en donde los valores para  $^{238}\text{U}$  y  $^{210}\text{Pb}$  están por debajo de la actividad mínima detectable, sin que por ello se pueda afirmar una tasa significativa de disequilibrio.

## 9.1.1.2. Estimación del contenido en agua durante el tiempo de enterramiento.

No existen referencias en la literatura que permitan cuantificar el contenido en agua de los depósitos durante el tiempo de enterramiento y su contribución al factor de atenuación de la radiación natural del medio. Es por ello por lo que se realiza una aproximación en función de los valores de humedad y saturación obtenidos para cada muestra, teniendo en cuenta que a lo largo de la historia de los propios depósitos y una vez abandonados al encajarse el río a cotas más bajas y dando lugar a la formación de los niveles de terraza fósil, el contenido en agua a lo largo del tiempo de enterramiento estará condicionado por el valor de saturación, que es el contenido máximo de agua que alojaron los materiales al ser depositados.

En un reciente trabajo para los últimos 550ka, se ha descrito, para las zonas montañosas de Galicia, un glaciario de tipo húmedo (Railsback, et al. 2017). Esto implicaría para el resto del territorio situado a cotas más bajas una gran disponibilidad de agua y por tanto condiciones de humedad elevada como lo prueba el hecho de que la mayor parte de los depósitos correspondientes a los últimos 550ka son depósitos de cantos y gravas matriz-soportado (Nonn, 1966; Vidal-Romaní, 1978) por lo que las condiciones de drenaje no deberían verse impedidas. Es por ello por lo que se consideran unas condiciones de humedad relativamente homogéneas a lo largo del tiempo (Cuaternario superior), independientemente de la profundidad a la que se extraen las muestras y de su distancia al nivel freático desde el momento en el que fueron depositados hasta el momento en el que se realizó el muestreo para su estudio en esta Tesis doctoral. Así, para estos depósitos de origen aluvial, la proporción de humedad respecto a saturación (esto es, el porcentaje de humedad dividido del porcentaje de saturación) se sitúa entre el 30% y 50%, por lo que se puede asumir que la cantidad de agua a lo largo del tiempo de enterramiento se aproxime a un 40% del valor de saturación con un error del 10%.

### 9.1.1.3. Tasa de radiación natural ( $DR$ ) y relación con la sobre-dispersión.

Las alícuotas pueden presentar distinto grado de dispersión y variabilidad en la señal de luminiscencia, aún estando expuestas a una misma dosis natural, a lo que hay que añadir la posible presencia de heterogeneidad en la tasa de radiación dentro del sedimento. La relación existente entre factores estadísticos como la sobre-dispersión ( $OD$ ) y tasa de radiación ( $DR$ ), o la proporción de potasio como fuente de  $^{40}\text{K}$  en las diferentes fracciones granulométricas permite analizar los posibles efectos de la variación micro-dosimétrica, como heterogeneidad de la componente beta, en la sobre-dispersión.

En vista de los resultados obtenidos la  $DR_{\text{TOTAL}}$  no varía como cabría esperar en función de la litología de la que proceden las muestras (Tabla 7). No obstante, aunque no se puede establecer una correlación clara entre la  $OD_{\text{EBG}}$  y la  $DR_{\text{TOTAL}}$  -de tipo lineal ni de otro tipo (exponencial o logarítmica)-en base a los valores que presenta el coeficiente de correlación  $R$ , por debajo de 0.5 y de signo negativo (Fig. 8.8.1), sí se observa una tendencia negativa entre ambas variables de manera que, cuando la  $DR_{\text{TOTAL}}$  alcanza valores de 2(Gy/ka) el porcentaje de  $OD_{\text{EBG}}$  desciende, según este ajuste, hasta casi un 20%, para las muestras de sedimentos desarrollados en la cuenca del río Mero (MPK). Esta tendencia también se manifiesta entre la  $DR_{\text{BETA}}$  y la  $OD_{\text{EBG}}$  (Fig. 8.8.2).

Como la  $DR_{\text{TOTAL}}$  es un sumatorio de componentes, para analizar las variaciones a efectos de microdosimetría que se producen en el sedimento, es importante tener en cuenta el poder de penetración de cada una de ellas (Fig. 4.1). Se asume que la radiación gamma es homogénea entre los granos dentro del sedimento, o al menos, a lo largo del diámetro que presenta el testigo. La componente beta, con menor poder de penetración, puede ser heterogénea dentro de la matriz de la propia muestra, por lo que resulta importante analizar la  $DR_{\text{BETA}}$ , sus fuentes, principalmente el potasio, y su relación con la sobredispersión.

El análisis cuantitativo llevado a cabo para determinar el contenido en potasio presente en las distintas fracciones granulométricas de las muestras de la cuenca del río Mero (MPK) indica, en primer lugar, su escasa proporción respecto a otros elementos, como el sílice o el aluminio (Tabla 17 y Fig. 3.5), lo que resulta coherente con la procedencia de los materiales depositados: esquistos para la mayoría de estas muestras, a excepción de la muestra de Vilaboa (MPK8), cuyo material de procedencia es un granito. No obstante, además de la proporción, es importante conocer su distribución en las distintas fracciones granulométricas, teniendo en cuenta la proporción de estas.

En la siguiente tabla (Tabla 73), se describe el porcentaje normalizado de potasio a partir de las propias proporciones que presentan cada una de las fracciones granulométricas analizadas. En base a estos resultados se puede establecer, para estas muestras del río Mero, que el potasio (y por extensión el potasio-40) está presente principalmente en la fracción fina o limo-arcillosa (<63 $\mu\text{m}$ ), mientras que en la fracción gruesa o arenosa (62-1000 $\mu\text{m}$ ) el contenido es proporcionalmente inferior, a excepción de la muestra de Bribes (MPK1), con valores más homogéneos entre ambas fracciones (con un porcentaje de 1.18 y 0.83, respectivamente), y a

excepción también de la muestra de Vilaboa (MPK8), de naturaleza granítica, con una mayor proporción de potasio en la fracción gruesa (2.65%) respecto a la fracción fina (0.39%). Existe, por tanto, una distribución heterogénea del potasio en el sedimento, predominando en la fracción fina, concretamente en las partículas del tamaño de los limos (2-63 $\mu$ m). También se puede observar en la misma tabla como una mayor proporción de potasio supone un incremento en la  $DR_{BETA}$ , a excepción de la muestra de Bastiagueiro (MPK7) si bien, esta muestra presenta una estimación de la  $DR_{BETA}$  de  $0.66\pm0.22$ (Gy/ka) lo que supone un error del 33%. Para el resto de muestras, a medida que desciende la proporción de potasio, también lo hace la dosis beta. Esta tendencia positiva entre ambas variables, para las muestras desarrolladas en la cuenca del río Mero y la península de Sada (MPK), también se observa en los gráficos de dispersión (Fig. 8.8.9).

**Tabla 73.** Porcentaje de potasio (K) en las distintas fracciones granulométricas medidas (f-Fina: fracción fina o limo-arcillosa (<63 $\mu$ m); f-Gruesa: fracción gruesa o arenosa (63-1000 $\mu$ m). El porcentaje de K se ha multiplicado por la proporción (en tanto por uno) de cada fracción granulométrica a modo de normalización, y para la fracción arenosa se han promediado los valores de los tamaños de partícula de arena fina, arena media y arena gruesa obtenidos mediante FRX (Tabla TT-FRX-MPK pag. 52). Se incluye la litología de procedencia de los sedimentos: (E) esquistos y (G) granitos, así como el porcentaje de potasio estimado mediante espectrometría gamma *in situ*; (n.d.): sin dato.

Muestra	(%) K f-Fina	(%) K f-Gruesa	(%) K-Total	DR-BETA (Gy/ka)	OD (%)
Bribes MPK1- (E)	1.18	0.83	2.01	$0.82\pm0.17$	$35\pm5$
Sta.Cruz MPK2- (E)	0.71	0.19	0.90	$0.54\pm0.14$	$50\pm7$
Dorneda MPK3- (E)	0.71	0.07	0.78	$0.65\pm0.16$	$30\pm5$
Mera MPK4- (E)	0.59	0.06	0.65	$0.46\pm0.08$	$39\pm5$
Mesón-Perillo MPK5- (E)	0.68	0.07	0.75	$0.60\pm0.09$	$32\pm5$
Cecebre MPK6- (E)	0.49	(n.d.)	(n.d.)	$0.30\pm0.07$	$78\pm7$
Bastiagueiro MPK7- (E)	0.65	0.06	0.71	$0.66\pm0.22$	$13\pm5$
Vilaboa MPK8- (G)	0.39	2.65	3.05	$0.84\pm0.09$	$28\pm5$



Respecto a la relación entre la  $DR_{BETA}$  y la sobre-dispersión ( $OD_{EBG}$ ), en la misma tabla, y exceptuando la muestra de Bastiagueiro (MPK7), se puede observar como a medida que la proporción de potasio se incrementa y aumenta la  $DR_{BETA}$ , el porcentaje de  $OD_{EBG}$  estimado desciende. Esta tendencia, también se ha observado en los gráficos de dispersión correspondientes (Fig. 8.8.10), aún no pudiéndose establecer una correlación clara en base a un ajuste de tipo lineal (o de cualquier otro tipo). No obstante, en ausencia de factores intrínsecos que puedan justificar la variabilidad de los datos, como se observa en los porcentajes de  $OD_{EBG}$  estimados a partir del test *Dose-recovery* (ver apartado 8.1.2.6. y Tabla 11), y en ausencia de blanqueamiento incompleto, en vista de los resultados obtenidos en las pruebas de normalidad -a excepción única de la muestra de Cecebre (MPK6), susceptible de presentar señal OSL residual debido a este fenómeno (Tabla 20)- sí se observa que la proporción de potasio, y por tanto las variaciones microdosimétricas observadas en cada una de las muestras, están contribuyendo de algún modo a un incremento de la sobredispersión ( $OD_{EBG}$ ). Este aspecto implica que la microdosimetría contribuye de manera importante a incrementar la sobre-dispersión, siendo el modelo de edad CAM el más adecuado y recomendable para la estimación de la dosis equivalente ( $De$ ) y del rango de edad.

### 9.1.2. Señal OSL de las muestras MPK.

#### 9.1.2.1. Señal natural OSL.

Para muestras antiguas, que por lo general están sometidas a radiación ionizante natural durante largos periodos de tiempo de enterramiento cabe esperar una señal OSL ( $L_N$ ) intensa que correspondan a dosis altas. No obstante, la señal OSL de las muestras desarrolladas en la cuenca del río Mero (MPK) -consideradas de forma relativa como antiguas- se caracteriza por ser una señal de intensidad muy baja, esto es, un número bajo de cuentas por unidad de tiempo de estímulo lumínico, como se puede observar en los gráficos de distribución de la señal natural OSL (Fig. 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4) o en los gráficos en los que se representa la curva de caída de la misma señal (Fig. Fig. 8.2.1 y 8.2.2). Además, para estas muestras se obtienen, también, estimaciones de dosis muy variables, que van desde unas pocas decenas hasta valores cercanos o superiores a los 200Gy (Fig. 8.9.1). Esta condición desfavorable no ha impedido, sin embargo, emplear la señal OSL para realizar estimaciones correspondientes de la dosis equivalente ( $De$ ), si bien, en algunos casos, se han rechazado alícuotas debido a que la señal OSL de fondo (LBG o EBG) superaba el límite establecido de referencia de 1/3 del valor de la señal rápida OSL extraída en los primeros 0.5s (Murray y Wintle, 2000) o bien sobrepasaban el umbral de saturación (Wintle and Murray, 2006). Por su parte, las muestras desarrolladas en la desembocadura del río Ulla a la altura de la localidad de Catoira (ABC), presentan una tasa de radiación anual ( $DR$ ) similar (Tabla 7), una amplia variabilidad y dispersión en la estimación de la dosis (Fig. 8.9.2), pero una señal algo más intensa (Fig. 8.1.5, 8.1.6, 8.1.7, 8.1.8 y 8.2.3).

En general, para las alícuotas aceptadas, existe una amplia dispersión en las  $De$  estimadas y, sin embargo, como se puede observar en los gráficos de dispersión en donde se representa la señal OSL normalizada frente a la señal OSL natural (Fig. 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4), los ratios de normalización ( $L_N/T_N$ ) son muy homogéneos, con valores entre 1 y 5 para el método de integración LBG y hasta 10 para el método EBG. Independientemente del valor de la  $De$  estimada, las dosis más altas no se correlacionan de forma significativa con las señales más intensas y estas señales más intensas no se corresponden, necesariamente, con los ratios ( $L_N/T_N$ ) más elevados. Resulta importante tener en cuenta este último aspecto ya que se observa, para algunas alícuotas, una reducción del ratio de la señal normalizada a medida que se incrementa la dosis hacia la zona de saturación de la señal OSL. En estos casos, se propone que la señal  $L_N$  o  $L_X$  está saturada y no muestra las variaciones en la sensibilidad de luminiscencia que proporcionalmente debería presentar a dosis elevadas, debido a que todas las trampas están ya ocupadas, a diferencia de su señal de normalización  $T_N$  o  $T_X$  correspondiente, la cual sí manifiesta estas variaciones en la sensibilidad. Por tanto, aumenta el valor del denominador ( $T_X$ ) pero no el del numerador ( $L_X$ ), descendiendo el ratio –o no experimentando el aumento que le correspondería al incrementarse la dosis (Duller, 2012). La consecuencia de ello son curvas de crecimiento cuyo ratio a dosis elevadas (y en saturación) tienden a reducirse (e incluso decrecer), acompañadas de una alta probabilidad de infra-estimación e incremento de la sobre-dispersión motivadas por una elevada contribución de la componente media de la señal OSL respecto a la componente rápida de la misma (Duller, 2012; Feathers y Pagonis, 2015). No obstante, la contribución de la señal lenta y media, como se explicará más adelante, queda, hipotéticamente, reducida al emplear el método de integración EBG, por lo que este tipo de infra-estimación asociada a la componente media, así como el incremento de la OD, se verían reducidos, si bien, la exclusión de aquellas alícuotas cuya estimación de la  $De$  están próximas a la saturación (establecida para las presentes muestras en 200Gy) debido a su reducida fiabilidad, implica una infra-estimación sistemática de la dosis – ya que se están excluyendo las dosis más elevadas en el cálculo de los promedios ponderados utilizados para la estimar la  $De$ - acompañado, además, de un descenso de la  $OD_{EBG}$ .

Por otra parte, un incremento del ratio ( $L_N/T_N$ ) suele venir acompañado de un aumento del error asociado al mismo, como se observa en las barras de error de las mismas figuras. Esto conlleva un incremento del error en las estimaciones individuales (de cada una de las alícuotas) al interpolar esta señal natural corregida ( $L_N/T_N$ ) en la curva de crecimiento OSL, sobre todo al emplear el método EBG.

Existen varios aspectos relacionados con las variaciones de sensibilidad de la señal y el error en las estimaciones, como es el número de alícuotas que interpolan en la zona de saturación, aquellas que generan una curva de crecimiento con aberraciones o aquellas que no superan el test de reciclaje (Wintel and Murray, 2000 y 2006). Del total de las alícuotas analizadas, entre el 30 y el 50% -o más- se sitúa en el umbral de saturación de la señal OSL (Fig. 8.9.9), lo cual indica que un número considerable de alícuotas tiene una señal OSL saturada cuya estimación es poco fiable y asociada de un error muy elevado (Murray y Wintle, 2006).

Además, el porcentaje de alícuotas que presenta una curva de crecimiento no aceptable (debido a aberraciones, un mal ajuste, etc.) es muy bajo al emplear el método LBG y se incrementa de manera considerable al emplear el método EBG, reduciéndose el número de estimaciones individuales para obtener una estimación de la dosis equivalente ( $De$ ) promedio. Por otra parte, el 50% o más del total de las alícuotas que interpolan superan los criterios de aceptación. Para el resto de alícuotas, la proporción que no supera el test de recuperación es ínfimo, pero el porcentaje de alícuotas que no supera el test de reciclaje varía entre el 10 y el 30% (Fig. 8.9.10). Así, si el primer test, el de recuperación, hace referencia a las transferencias de cargas que se puedan generar a lo largo del protocolo y que pueden dar lugar a la emisión de señal OSL en ausencia de irradiación (en su ciclo correspondiente la dosis irradiada es de 0s o 0Gy), el segundo test, el test de reciclaje, evalúa la precisión –o el error sistemático– para la estimación de una dosis debido a las variaciones de sensibilidad que se producen al aplicar los distintos tratamientos (térmicos, radiactivos y lumínicos) del propio protocolo SAR (Murray and Wintle, 2000). Todo ello indica que muestras poco sensibles y con señales poco intensas presentan respuestas muy variables a los tratamientos del SAR, lo que conlleva una mayor probabilidad de error asociado debido, en este caso, a factores intrínsecos propios de los materiales empleados en la técnica.

#### 9.1.2.2. Curva de caída de la señal OSL y métodos de integración.

La curva de caída de la señal OSL registra un número de cuentas durante un tiempo de estímulo determinado (en este caso, 40s) para una alícuota dada, conformada por un determinado número de granos. Para las muestras desarrolladas en la cuenca del río Mero (MPK), aproximadamente el 90% de la señal es eliminada transcurridos 2 segundos de estímulo con LEDs azul (Fig. 8.2.1 y 8.2.2) considerándose que, en general, estas muestras presentan una curva de caída rápida, típica de la señal OSL para el cuarzo (Wintle and Murray, 1998). Esto implica un predominio de la componente rápida de la señal OSL (Bailey, 1997; Jain et al., 2003; Singarayer and Bailey, 2003; Murray and Wintle, 2006; Cuninham and Wallinga, 2010) cuya contribución resulta un requisito fundamental para la aplicación del protocolo SAR (Wintle and Murray, 2000). No obstante, el bajo grado de intensidad de la señal y la baja sensibilidad reducen, *a priori*, la contribución de la componente rápida de la señal OSL, más deseable, en favor de las señales media y lenta, que son consideradas como señal de fondo o ruido (ver apartado 3.3.). Es por ello por lo que se han analizado los resultados considerando dos intervalos de integración distintos, el LBG y EBG (Ballarini et al. 2007), que hipotéticamente incluyen como señal de fondo a estas componentes media y lenta, aunque las diferencias que se observan entre los métodos de integración LBG y EBG se traducen únicamente, y como ya se ha comentado, en ratios de la señal normalizada  $L_N/T_N$  algo mayores para EBG (Fig. 8.2.1 y 8.2.2-recuadro interno), lo que supone, a su vez, curvas de crecimiento de mayor pendiente e intensidad, sin que por ello se reduzcan ni el error asociado a la señal

OSL natural ( $L_N$ ) o regeneradas ( $L_x$ ) – señales a partir de las que se construye la curva de crecimiento- ni el error de las estimaciones al interpolar en dicha curva.

La aplicación de uno u otro método de integración (LBG o EBG), y por tanto de señales OSL distintas, para la estimación de la  $De$  no genera resultados dispares (teniendo en cuenta que con el método EBG se reduce, hipotéticamente, la contribución de las señales media y lenta, no deseables). Los valores de los estimadores centrales obtenidos para cada uno de los métodos de integración son muy similares, pero además, los valores de la media y la mediana obtenidos mediante el método LBG son muy similares a los obtenidos mediante el método EBG. Este aspecto, además, puede aplicarse también a los valores obtenidos mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  y  $CAM_{EBG}$ . (Tabla 22), e incluso, para la muestra MPK7, la estimación de la  $De$  obtenida mediante el modelo  $MAM_{EBG}$  coincide con la del modelo  $CAM_{EBG}$  (y con la del modelo  $IEU_{EBG}$ ).

Por su parte, la  $OD_{EBG}$  para las muestras de Bribes (MPK1), Dorneda (MPK3), Mesón da Auga-Perillo (MPK5) o Bastiagueiro (MPK7) se reduce entre un 10 y un 15% respecto a la  $OD_{LBG}$ , mientras que para el resto de muestras permanece constante (Tabla 16). No obstante, para aquellos casos en los que la sobre-dispersión se reduce al emplear el método EBG ( $OD_{EBG}$ ) no parecen influir aspectos como el porcentaje de alícuotas que no interpolan, la proporción de alícuotas cuya señal OSL está saturada o que presentan una curva OSL con aberraciones o con un mal ajuste, o el porcentaje de alícuotas rechazadas porque no superan el test de reciclaje o aquellas que son finalmente aceptadas (todos ellos con valores muy variables entre las distintas muestras). Esto indica que, en principio, el uso de una u otra señal OSL extraída a partir de los métodos de integración de la señal LBG o EBG puede causar una ligera variación de la incertidumbre debido a la contribución de las componentes media y lenta en la señal OSL, pero que, en ningún caso, es un factor (intrínseco) determinante que contribuya a que la sobre-dispersión aumente (Duller, 2000; Thomsen, 2003).

Cabe añadir que a partir de la estimación de la  $OD$  en el test *Dose-recovery*, con el que se analiza la idoneidad del protocolo SAR a partir de alícuotas cuya señal OSL ha sido previamente y cuya dosis inducida es idéntica, eliminando los factores extrínsecos que puedan contribuir a incrementar la  $OD$  (como blanqueamiento incompleto de la señal y heterogeneidad en la microdosimetría), se puede estimar la contribución de factores intrínsecos, como es la estadística de cuentas de luminiscencia, entre otros. No obstante, en vista de los resultados (Tabla 11), con porcentajes de  $OD$  que generalmente están por debajo del 10%, independientemente del método de integración LBG o EBG y tanto para las muestras del río Mero (MPK) como para las muestras del río Ulla en Catoira (ABC), no parece que la baja intensidad de la señal OSL o las componentes media y lenta tengan como consecuencia un incremento de la sobredispersión.

### 9.1.2.3. Error absoluto y error relativo

Para las muestras analizadas, la magnitud del error es generalmente elevada, como cabe esperar para muestras antiguas. No obstante, tanto para el error absoluto como para el error relativo, no se observa de manera clara correlación o dependencia respecto a la dosis, como sugieren los coeficientes de correlación lineal calculados así como la pendiente de la recta de regresión lineal obtenida (Tabla 10) lo que justifica el hecho de que alícuotas que proporcionan mayores dosis (esto es, una estimación de la  $De$  más elevada) no se corresponden necesariamente con aquellas que tienen un error asociado mayor ni, como se acaba de comentar en el apartado anterior, una señal OSL más intensa. Por tanto, existen alícuotas con una señal OSL poco intensa y, sin embargo un error asociado elevado (tanto para el método LBG como EBG).

Este incremento del error observado (el error asociado oscila entre el 10% y el 40%) supone una menor precisión de las estimaciones al interpolar en la curva de crecimiento de la señal OSL regenerada (Aitken, 1998). No obstante, estos problemas de precisión se atenúan al ponderar los resultados con su error, como ocurre al emplear el modelo CAM (Galbraith, 1999). Así, las alícuotas con un error asociado más bajo tienen un mayor peso en la estimación de la  $De$  y aquellas con un error asociado elevado apenas tienen relevancia en la estimación, reduciéndose, a su vez, la sobre-dispersión ( $OD$ ), parámetro que se calcula a partir del mismo modelo. Por otra parte, mediante la aplicación del método de integración EBG se maximiza hipotéticamente la contribución de la señal rápida (Wintle and Murray, 2006; Ballarín et al. 2007; Cunningham and Wallinga, 2010) al eliminar la contribución de las señales media y lenta que pudieran estar generando un incremento de la incertidumbre. No obstante, ni las estimaciones ni la magnitud del error disminuyen al emplear el EBG - aunque sí se reduce, en ocasiones, estimaciones de la  $OD_{EBG}$  frente a las estimaciones de la  $OD_{LBG}$ , como se ha comentado anteriormente (Tabla 16)- por lo que, en vista de los resultados, el error asociado parece tener mayor relación con señales poco intensas, ratios de normalización bajos -especialmente al emplear el método EBG- y baja sensibilidad de luminiscencia, aspectos, todos ellos, más relacionados con la propia naturaleza de los granos de cuarzo.

### 9.1.2.4. Señal OSL del *Test-dose* y estimación de la paleodosis.

La señal OSL del *test-dose* ( $T_N$ ) obtenida tras la medida de la señal natural OSL ( $L_N$ ) en el primer ciclo del SAR es, generalmente, tanto para las muestras del Mero (MPK) como del Ulla (ABC), una señal poco intensa, con un error asociado elevado y una amplia dispersión, independientemente de la magnitud de la  $De$  estimada. Tampoco se observa, por tanto, ninguna correlación entre esta señal ( $T_N$ ) y la dosis (Fig. 8.4.1, 8.4.2, 8.4.3, 8.4.4, 8.4.5, 8.4.6 y 8.4.7). No obstante, sí están presentes, en la mayoría de las muestras, algunas alícuotas con granos de cuarzo más sensibles y que presentan una señal  $T_N$  más intensa y, para las cuales, el error se reduce considerablemente por lo que su contribución individual a la estimación muestral mediante el modelo

CAM gana peso y, a su vez, el propio modelo, resulta más consistente. De nuevo, el error asociado se relaciona con aspectos intrínsecos relacionados con los materiales empleados (los granos de cuarzo), más que a la propia técnica (Thomsen, 2005; 2007).

#### 9.1.3. Estimaciones individuales: distribución y modelos de edad.

La distribución de las estimaciones de la *De* individuales que se obtiene a partir de la señal OSL de cada una de alícuotas aceptadas según los requisitos del SAR para las muestras pertenecientes a los depósitos fluviales, tanto del Mero como del Ulla, se caracteriza, principalmente, por una amplia dispersión y un error asociado elevado. No obstante, al aplicar los test de normalidad, y a excepción de la muestra de Cecebre (MPK6), las distribuciones de estas muestras son simétricas y siguen una distribución de tipo normal (gaussiana), al menos con un nivel de significación del 1% (Tabla 20 y 21). Si se eleva el nivel de significación al 5% la distribución de las muestras también sigue una normal a excepción de la muestra de Vilaboia (MPK8), para la cual se obtiene un p-valor del 0.033 al aplicar el método EBG y a partir de 26 estimaciones. El motivo por el cual los resultados sugieren que se rechace la hipótesis de normalidad para esta última muestra se debe al elevado número de alícuotas que interpolan en la zona lineal de saturación (establecida a partir de los 200Gy) y que se han excluido de la estimación de la *De* muestral y de estos test de normalidad por lo que, en base a los resultados obtenidos y la forma de la distribución, se puede considerar que esta sigue un de tipo normal. Así, considerando que las distribuciones de las muestras del Mero (MPK) y del Ulla (ABC) siguen una distribución unimodal y simétrica centrada en la media ponderada, el modelo de edad central (CAM) resulta más apropiado (Wallinga, 2002), si bien, este modelo pierde consistencia cuando los porcentajes de *OD* superan el 30% (Olley, 2004; Arnold and Roberts, 2009; Murray et al., 2012). Para sedimentos fluviales existen varios factores que pueden contribuir al incremento de la *OD*, como el fenómeno de blanqueamiento incompleto -y que puede dar origen a una sobre-estimación de la *De* al emplear el modelo CAM- o aspectos relacionados con la microdosimetría del sedimento como heterogeneidad en la radiación beta.

Por otra parte, las estimaciones obtenidas mediante el modelo de edad mínima (MAM), generados a partir de la distribución normal truncada que conforman la población de alícuotas que representan hipotéticamente a los granos bien blanqueados, presentan la problemática derivada de si esa población está conformada por un número significativo de alícuotas que justifique la utilización del modelo y que ofrezcan una estimación perteneciente al último periodo de enterramiento a partir de una señal OSL bien blanqueada antes de su deposición o, por el contrario, es una población conformada por una única alícuota o un escaso número de ellas -de decenas de alícuotas analizadas- y que resulten, finalmente, ser un dato atípico dentro de la distribución (*outliers*), originados por diversos factores como por una baja sensibilidad e intensidad de la señal de luminiscencia, lo que restaría consistencia al modelo.

Respecto al modelo IEU (*Internal-External Consistency Criteria*), empleado para muestras susceptibles de blanqueamiento incompleto como se comentó en los principios de luminiscencia (ver apartado 5.2.4.3.), está basado en la asunción a partir de la cual los datos procedentes de la población conformada por los granos bien blanqueados sigue una distribución normal cuya dispersión está únicamente afectada, de forma ideal, por factores intrínsecos. Así, la estimación de la población de granos con un blanqueamiento completo se realiza a partir de las diferencias en el error estándar asociado, extrayendo la incertidumbre interna como un cálculo del error individual, y la incertidumbre externa que combina la estimación individual de la incertidumbre respecto a la media ponderada (Thomsen, 2003). No obstante, en los gráficos de distribución (Fig. 8.10.1 a la 8.10.14) no se observa una sub-población de alícuotas que sigan una distribución normal centrada en las estimaciones de la  $De$  obtenidas mediante este modelo ni un número significativo de alícuotas en torno a dicha estimación, y en los casos en los que la distribución se centra en la estimación obtenida mediante el modelo IEU esta coincide con la obtenida mediante el modelo CAM.

Por tanto, si se tienen en cuenta únicamente las estimaciones obtenidas mediante el método EBG, mediante el cual se sustraen hipotéticamente las componentes media y lenta de la señal OSL, minimizando su contribución y evitando los problemas de sobre-estimación de la  $De$  que estas señales conllevan al utilizar únicamente la componente rápida (más deseable) para realizar las estimaciones (Wintle and Murray, 2006), la discusión se centra en el modelo de edad a elegir, si bien, como se ha comentado en los resultados, las diferencias entre la distribución de los datos obtenidos empleando el método LBG y EBG son mínimas, variando únicamente el número final de alícuotas aceptadas del total analizadas. Además, para cada una de las muestras, no se observan diferencias entre las estimaciones que proporcionan los modelos  $CAM_{LBG}$  y  $CAM_{EBG}$  (Tablas 53 y 54).

La estimación de la  $De$  mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  cuenta únicamente con el inconveniente que se deriva de factores de tipo estadístico, como el porcentaje de  $OD$  estimado para cada muestra y generalmente ubicado muy próximo al límite recomendado del 30%. Como se ha comentado, la  $OD$  puede originarse por diversas causas, entre ellas, los factores externos como blanqueamiento incompleto de la señal o heterogeneidad en la micro-dosimetría de la muestra, son los que suelen afectar a los depósitos fluviales (Olley, 99; Rittenour, 2008). El fenómeno de blanqueamiento incompleto da lugar a la presencia en la distribución de los datos de una población con granos bien blanqueados y otra con una carga residual. No obstante, los resultados obtenidos en los análisis de la distribución y los test de bondad de ajuste realizados indican distribuciones simétricas en donde los datos pertenecen a una única población muy dispersa que siguen una distribución de tipo normal (Fig. de la 8.9.3 a la 8.9.8; Tablas 20 y 21). No se observan, por tanto, evidencias del efecto producido por el fenómeno de blanqueamiento incompleto, sin contribuir al incremento de la  $OD$ .

Por otra parte, la elevada dispersión de los datos sí está asociada de algún modo con la de distribución de potasio, predominante en la fracción limosa, y su proporción, estableciéndose una tendencia mediante la cual un aumento en porcentaje de K viene acompañado de un incremento de la  $DR_{\text{BETA}}$  y, como se discutió anteriormente, un descenso de la  $OD_{\text{EBG}}$ . Como también se ha comentado, en base a los porcentajes de  $OD$  estimado en el test *Dose-recovery*, por debajo del 10%, aquellos factores intrínsecos como fluctuaciones en el número de cuentas, reproductibilidad instrumental, transferencia térmica, etcétera (Thomsen, 2005) no explicarían la magnitud de la  $OD$  observada para la mayoría de estas muestras. Así, el único argumento razonable que justifique el amplio grado de dispersión tendría relación con la heterogeneidad beta presente en las muestras, aspecto relacionado con la microdosimetría de los sedimentos, así como la utilización de minerales de cuarzo poco sensibles a la luminiscencia y con una señal OSL muy poco intensa -por lo menos en lo que se refiere a su componente rápida- dando lugar a estimaciones de la  $De$  muy variadas, lo que induce a emplear el modelo CAM para estimar la  $De$ .

Si aún así se descarta la utilización del modelo CAM debido a los altos porcentajes de  $OD$  estimados – relacionados con la microdosimetría y no con el fenómeno de blanqueamiento incompleto o factores intrínsecos- y se tiene en cuenta además la presencia de un número de alícuotas igual o mayor a cuatro incluidas dentro del i.c. del 95% del modelo MAM y no consideradas como datos atípicos para algunas de las muestras como la de Bribes (MPK1), Mera (MPK4), Cecebre (MPK6) o Bastiagueiro (MPK7), la dosis equivalente ( $De$ ) estimada varía considerablemente. No obstante, para la muestra de Bastiagueiro (MPK7), la estimación de la  $De$  mediante el modelo  $CAM_{\text{EBG}}$ , con una  $OD$  de  $13\pm5\%$ , coincide casi exactamente con la estimación obtenida mediante el modelo  $MAM_{\text{EBG}}$ , obteniéndose un rango de edad de  $92\pm21\text{ka}$ . Para las otras muestras, el rango de edad estimado mediante el modelo  $MAM_{\text{EBG}}$  supone edades aproximadas de  $25\pm5\text{ka}$  para la muestra de Bribes (MPK1),  $45\pm10\text{ka}$  para la de Mera (MPK4), o  $5\pm1\text{ka}$  para la muestra de Cecebre (MPK6). Este último dato resulta incoherente para este tipo de depósito.

Respecto al modelo IEU y empleando el método EBG, las estimaciones obtenidas para las muestras de Dorneda (MPK3) y Bastiagueiro (MPK7) coinciden con las del modelo  $CAM_{\text{EBG}}$ , presentando un porcentaje de  $OD_{\text{EBG}}$  del  $30\pm5\%$  y  $13\pm5\%$ , respectivamente. Para las muestras de Bribes (MPK1), Santa Cruz (MPK2), Mesón-Perillo (MPK5) y Vilaboa (MPK8), los valores de la  $De$  estimados mediante este modelo  $IEU_{\text{EBG}}$  se sitúan entre las estimaciones obtenidas mediante los modelos  $CAM_{\text{EBG}}$  y  $MAM_{\text{EBG}}$ , si bien, para estas muestras, el porcentaje de  $OD$  es superior al 30%, a excepción de la muestra de Vilaboa (MPK8) con una  $OD_{\text{EBG}}$  del  $28\pm5\%$ . Por último, para la muestra de Mera (MPK4), la estimación de la  $De$  mediante el modelo  $IEU_{\text{EBG}}$  coincide con la obtenida mediante el modelo  $MAM_{\text{EBG}}$ , presentando una  $OD_{\text{EBG}}$  del  $39\pm5\%$  (Tabla 22). En general, y para muestras simétricas con una distribución normal, las estimaciones obtenidas mediante el modelo  $CAM_{\text{EBG}}$  e  $IEU_{\text{EBG}}$  coinciden cuando se reducen los porcentajes de  $OD$ , distanciándose a medida que ésta se incrementa.



Respecto a las muestras de Catoira (ABC), y también a partir de los datos obtenidos mediante el método EBG, la estimación de la  $De$  para la muestra de Borreiros (ABC1) mediante el modelo  $IEU_{EBG}$  coincide con las estimaciones obtenidas mediante el modelo  $CAM_{EBG}$ , y para las muestras ABC2 (también de Borreiros) y ABC4 (de Santa Eulalia), las estimaciones del modelo  $IEU_{EBG}$  se sitúan en valores intermedios entre las obtenidas por los modelos  $CAM_{EBG}$  y  $MAM_{EBG}$  (Tabla 23). Así, en presencia de distribuciones simétricas y de tipo normal, según los test de bondad de ajuste y los coeficientes de asimetría y apuntamiento (Tabla 21), parece lógico que algunos resultados obtenidos mediante el modelo IEU y el modelo CAM coincidan, como es el caso de la muestra ABC1, con un tamaño de alícuota de 10 granos y que, además, cuenta con un porcentaje de  $OD_{EBG}$  del  $26\pm5\%$ .

#### 9.1.4. Selección del modelo de edad y rango de edad para los depósitos fluviales analizados.

Para obtener una estimación definitiva de la  $De$  y un cálculo del rango de edad, se optará, por una parte, por seleccionar los datos extraídos del método EBG, y por otra, la estimación obtenida mediante el modelo CAM cuando el porcentaje de  $OD$  sea igual o inferior al 30%, como se viene haciendo en los últimos estudios realizados al aplicar la técnica de datación OSL en sedimentos fluviales (Medialdea, 2013; Bickel et al., 2015; Hardt et al., 2016; Muñoz-Salinas et al., 2017) o estudios en los que, incluso para muestras con blanqueamiento incompleto y de las cuales se ha extraído la señal IRSI, se ha empleado el modelo CAM con porcentajes de  $OD$  estimada que llegan hasta el 40%, valor a partir del cual se ha empleado el modelo MAM y obteniéndose un rango de edad aceptado (Trauerstein et al., 2014). Así, para la muestra de Bastiagueiro (MPK7), con un porcentaje de sobredispersión  $OD_{EBG}$  del  $13\pm5\%$ , se obtiene una edad aproximada de  $99\pm22$ ka, coincidiendo las estimaciones obtenidas mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  y el  $MAM_{EBG}$ . Este rango de edad se aproxima al obtenido mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  para la muestra de Dorneda (MPK3), de  $95\pm19$ ka, con una  $OD_{EBG}$  del  $30\pm5\%$ . Para la muestra de Vilaboa (MPK8), con una  $OD_{EBG}$  del  $28\pm5\%$ , se obtiene un rango de edad a partir del modelo  $CAM_{EBG}$  de  $85\pm12$ ka. Para la muestra de Mesón-Perillo (MPK5), y con una  $OD_{EBG}$  del  $32\pm5\%$ , el modelo  $CAM_{EBG}$  ofrece un rango de edad de  $75\pm11$ ka, y para la muestra MPK1, con una  $OD_{EBG}$  del  $35\pm5\%$ , el rango de edad estimado empleando el modelo  $CAM_{EBG}$  es de  $65\pm13$ ka (Tabla 74). Por último, la muestra de Santa Cruz (MPK2) presenta una  $OD_{EBG}$  del  $50\pm7\%$  que, en principio, restaría fiabilidad al rango de edad de  $58\pm8$ ka obtenido a partir del modelo  $CAM_{EBG}$ . No obstante, el rango de edad estimado mediante el modelo  $MAM_{EBG}$ , de  $10\pm11$ ka, resulta poco verosímil si consideramos la edad relativa esperable de acuerdo con el modelo de evolución geomorfológica que se ha propuesto, viniendo acompañado, además, de un error asociado superior a la propia estimación. Por último, la muestra de Cecebre (MPK6), presenta una  $OD_{EBG}$  superior al 70% y edades de  $46\pm12$ ka a partir del modelo  $CAM_{EBG}$  y de  $5\pm1$ ka a partir del modelo  $MAM_{EBG}$ . Es

por ello por lo que se acepta la edad estimada mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> para la muestra de Santa Cruz (MPK2) y se desestima cualquier rango de edad para la muestra de Cecebre (MPK6).

**Tabla 74.** Rango de edad final calculado (en ka=1000a) indicando el tipo de señal (OSL), el modelo de edad empleado (CAM o MAM) y el método de integración de la señal (LBG o EBG). Se incluyen las dataciones realizadas en los sistemas de terrazas del Bajo Miño (sistema fluvial Miño-Sil; NO de la Península Ibérica), incluyendo la señal empleada (OSL y pIR-IRSL); debido a que la señal OSL está saturada, se estimaron edades mínimas (2\*Do ) (Murray and Wintle, 2006) en el trabajo de referencia (Viveen, 2014).

Muestras	Edad (ka)	Otras edades de referencia
<b>Bribes (MPK1)</b> (CAM-EBG / OSL)	65±13	
<b>Santa Cruz (MPK2)</b> (CAM-EBG / OSL)	59±8	<b>Furna1</b> (OSL; Edad mínima): 45±12ka (Viveen, 2014)
<b>Dorneda (MPK3)</b> (CAM-EBG / OSL)	95±19	
<b>Mera (MPK4)</b> (CAM-EBG / OSL)	105±24	<b>Furna3</b> (pIR-IRSL; Edad mínima): 114±6ka (Viveen, 2014) <b>FTP-B</b> (pIR-IRSL; Edad mínima): 134±13ka (Viveen, 2014)
<b>Mesón-Perillo (MPK5)</b> (CAM-EBG / OSL)	77±11	
<b>Bastiaqueiro (MPK7)</b> (CAM-EBG / OSL)	99±22	
<b>Vilaboa (MPK8)</b> (CAM-EBG / OSL)	85±12	
<b>Borreiros (ABC1)</b> (CAM-EBG / OSL)	181±46	<b>Furna Top-1</b> (10Be): 187±6ka (Viveen, 2014) <b>Furna-01</b> (10Be): 196±6ka (Viveen, 2014)
<b>Borreiros (ABC2)</b> (CAM-EBG / OSL)	71±13	
<b>Santa Eulalia (ABC4)</b> (CAM-EBG / OSL)	62±25	
<b>Borreiros (ABC3)</b> (MAM-EBG / OSL)	73±20	

Respecto a las muestras desarrolladas en la desembocadura del río Ulla en Catoira (ABC1, ABC2 y ABC3 en Borreiros y ABC4 en Santa Eulalia) las características que presenta la distribución de los datos son similares a las anteriores muestras, con una amplia dispersión y ajuste a una distribución de tipo normal, por lo que para la selección del modelo de edad más adecuado se siguen las mismas pautas. Para la muestra de Borreiros (ABC1) y con un tamaño de alícuota de 10 granos, el porcentaje estimado para la OD<sub>EBG</sub> es del 26±5% el modelo CAM<sub>EBG</sub> gana fiabilidad, obteniéndose una edad de 180±46ka. Al emplear un tamaño de alícuota de 100 granos se incrementa la OD<sub>EBG</sub> hasta un 41±7%, desechándose el rango de edad estimado mediante el modelo CAM<sub>EBG</sub> de 170±45ka. Con ello, se observa que, al reducir el tamaño de alícuota, para ABC1, se reduce la sobredispersión y se incrementa el rango de edad estimado con el modelo CAM y MAM.

Del mismo modo ocurre con la muestra de Santa Eulalia (ABC4) que, con un tamaño de alícuota de 100 granos se obtiene una  $OD_{EBG}$  del  $54\pm 8\%$ , mientras que con un tamaño de 10 granos esta desciende hasta un  $35\pm 6\%$ . El rango de edad estimado mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  es de  $51\pm 10ka$  para el tamaño de 100 granos, y de  $62\pm 24ka$  para el tamaño de 10 granos. Tanto para la muestra de Borreiros (ABC1) como para la muestra de Santa Eulalia (ABC4), la reducción del tamaño de alícuota a 10 granos da lugar a ausencia de asimetría y reducción de la sobredispersión, lo que confiere mayor consistencia al modelo de edad central CAM.

Para la muestra ABC2 (Borreiros), la estimación de edad mediante el modelo  $CAM_{EBG}$  es de  $71\pm 13ka$ , con una  $OD_{EBG}$  del  $32\pm 5\%$ . Por último, respecto a la muestra ABC3 (también en Borreiros), existe un número de alícuotas muy elevado cuya estimación se sitúa en la zona de saturación y que se han incluido dentro del modelo  $CAM_{EBG}$ , hecho que reduce la fiabilidad de las estimaciones. Es por ello por lo que se considera válido el rango de edad obtenido mediante el modelo  $MAM_{EBG}$  de  $72\pm 20ka$ , coherente con las edades obtenidas para las muestras ABC1 y ABC2, extraídas en el mismo depósito de Borreiros pero a mayor profundidad dentro del perfil. Así, en la misma tabla (Tabla 74), se describen los rangos de edad definitivos tanto para las muestras del Mero (MPK) como para las muestras del Ulla (ABC), en la cual se incluyen algunas de las dataciones absolutas descritas en los trabajos de Viveen (2012; 2013) en la zona del Baixo Miño (Sistema Miño-Sil; NO de la Península Ibérica), a modo de referencia y como único precedente local-regional, teniendo en cuenta que las edades calculadas a partir de la señal OSL y pIR-IRSL en estos trabajos son estimaciones de una edad mínima de referencia ( $2*DO-value$ ; Wintle and Murray, 2006), debido a la saturación de dichas señales. Por su parte, las dataciones obtenidas en los mismos trabajos a partir de núclidos cosmogénicos terrestres ( $^{10}Be$ ), no se consideran valores de referencia sino dataciones absolutas totalmente fiables.

#### 9.1.5. Aspectos geodinámicos y rangos de edad estimados para los depósitos fluviales analizados.

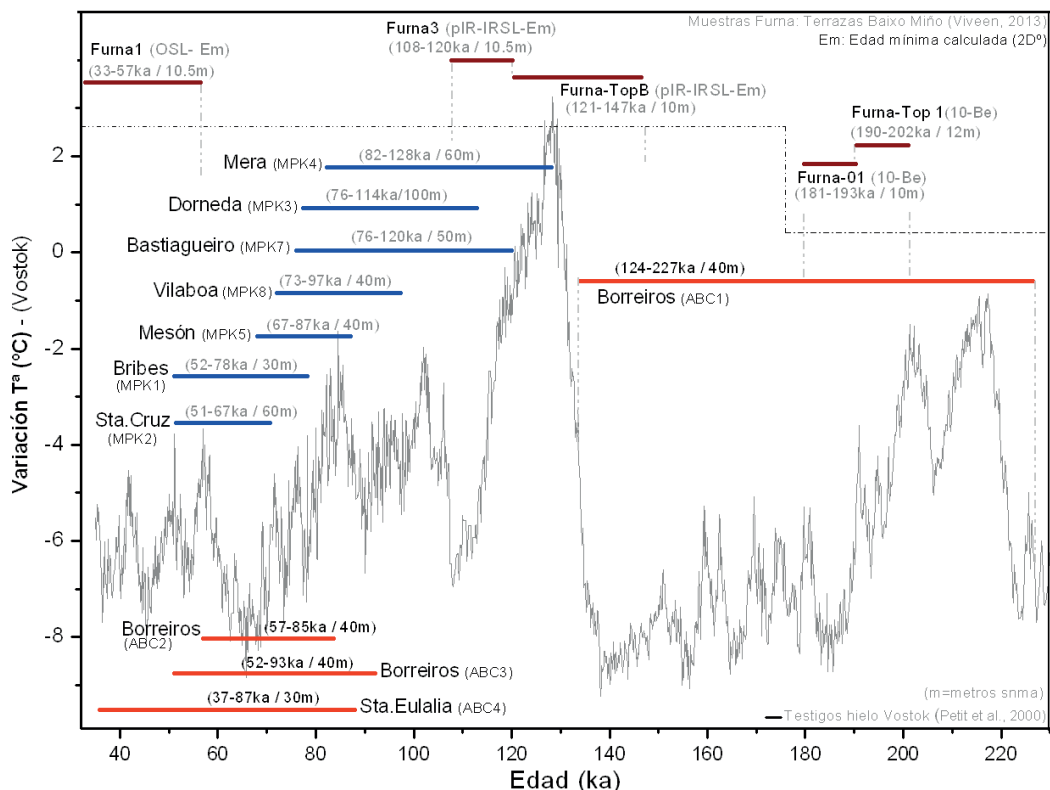
La secuencia de sedimentos fluviales desarrollados en la cuenca del río Mero y la península de Sada (muestras MPK) se han depositado, siguiendo el rango de edad calculado en el presente trabajo mediante la técnica de datación de luminiscencia OSL, entre los 128 y 50ka, obteniéndose una edad absoluta distinta a la estimada en base a criterios relativos (Nonn, 1966) y somáticos (el color rojo del depósito) y que este autor estimaba correspondiente al Villafranquense – piso de transición entre el Plioceno y el Cuaternario correspondiente a la asociación faunística de Villafranca de Astí (Italia) (Pareto, 1865), ubicada por algunos autores entre 3.4Ma y 1.3Ma (Chaline, 1982; McDougall, 1979; Berggren, 1987). La edad obtenida es muy diferente a pesar del rango de error, el cual se asocia a la baja sensibilidad de la señal OSL que presenta el cuarzo empleado, la baja intensidad de la tasa de radiación natural y a la amplia dispersión en la distribución de las estimaciones, más que hacer referencia a la propia antigüedad de las fases de sedimentación. No obstante, si se compara la edad promedio del depósito más antiguo y el más joven para las muestras del río Mero (muestras MPK), en este

caso MPK4 (Mera) y MPK2 (Sta. Cruz), con unos promedios de  $105\pm24\text{ka}$  y  $59\pm8\text{ka}$  -ambas con una cota relativa de 60m snma- se obtiene una diferencia aproximada de 50ka, representativa de la larga duración de dichos procesos deposicionales a lo largo del tiempo (Fig. 9.1). Respecto a los depósitos del río Ulla en Catoira (muestras ABC) y como se puede observar en la misma figura, la muestra ABC1 presenta una incertidumbre de más de 100ka. Por su parte, la diferencia de promedios observada entre las muestras ABC2, ABC3 y ABC4 (de  $71\pm13\text{ka}$ ,  $62\pm24\text{ka}$  y  $73\pm20\text{ka}$ , respectivamente) no supera los 10ka coincidiendo, además, con las estimaciones calculadas para las muestras de la cuenca del Mero (MPK).

Todos estos episodios de sedimentación -a excepción única de la muestra ABC1- tienen lugar después de producirse un incremento de más de  $10^{\circ}\text{C}$  en la temperatura en apenas 10ka (desde 140ka a 130ka, aproximadamente y como se evidencia en el registro de Vostok (Petit et al., 2000) representado en la misma figura. No obstante, a este rápido incremento de la temperatura le sucede un nuevo descenso de  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $-4^{\circ}\text{C}$  hace 120ka y de unos  $-6^{\circ}\text{C}$  entre 110 y 100ka. A partir de este momento y en base a las dataciones obtenidas, comienzan a desarrollarse los depósitos de Bastiagueiro (MPK7), Mera (MPK4) y Dorneda (MPK3).

Como se ha comentado anteriormente, tres de las cuatro muestras datadas pertenecientes al río Ulla en la localidad de Catoira (ABC2 y ABC3 en Borreiros, y ABC4 en Santa Eulalia), también se desarrollan en este intervalo de tiempo, entre los 93 y 37ka, así como los depósitos datados en otros trabajos de referencia próximos a la costa nor-atlántica como las muestras Furna1 y Furna3 (Viveen, 2013), para las cuales se ha calculado una edad mínima ( $2^{\circ}\text{DO-value}$ ; Wintle and Murray, 2006) como consecuencia de la saturación de la señal OSL observada, y que no suponen en ningún caso un rango de edad definitivo sino un valor mínimo de referencia.

Por su parte, la muestra ABC1, perteneciente a un paleocanal situado a un nivel inferior a la de las muestras ABC2 y ABC3 dentro del depósito de Borreiros (Catoira), se ha desarrollado, en base a la datación estimada en el presente trabajo, a lo largo de los distintos glaciales sucedidos entre los 227ka y los 135ka, periodo de tiempo durante el cual se registra, siguiendo la misma curva, una tendencia marcada por un descenso de la temperatura desde  $-1^{\circ}\text{C}$  hasta  $-9^{\circ}\text{C}$ . Otro dato de referencia y para el cual se ha estimado una edad mínima ( $2^{\circ}\text{DO-value}$ ) a partir de la señal pIR-IRSL, también saturada, es la obtenida para el depósito fluvial FTP-B. Viveen (2013), data el desarrollo del depósito entre 147ka y 121ka, coincidiendo con la última etapa de formación de ABC1 y llega a solaparse con el comienzo de la sedimentación del resto del depósito. Por tanto, la formación de los depósitos del Río Mero (MPK) y del Río Ulla a la altura de la localidad de Catoira (ABC), coinciden con periodos en donde observa una tendencia a la baja de las temperaturas globales y por tanto de una fase glacial o de caída del nivel del mar.

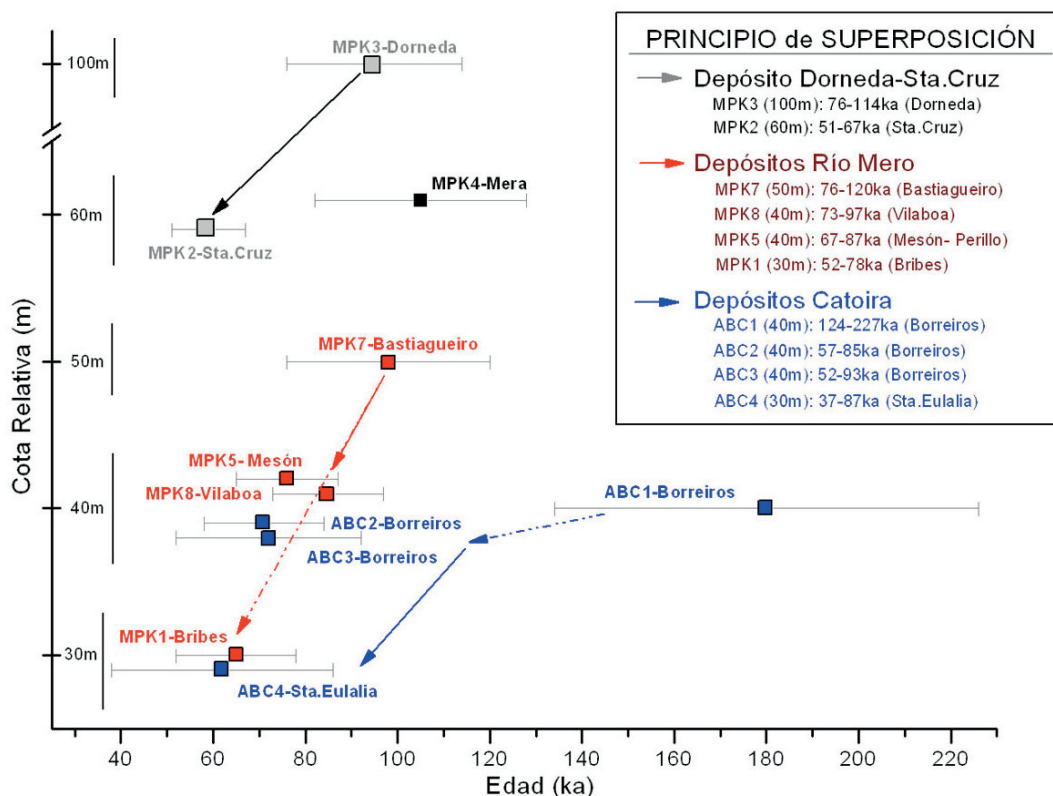


**Figura 9.1:** Comparativa de las dataciones obtenidas en el presente trabajo para los depósitos fluviales de la cuenca del Río Mero-Península de Sada (MPK) y del Río Ulla-Catoira (ABC) respecto a la variación de temperatura global estimada a partir de los registros de hielo de Vostok (Petit et al., 1999) entre 35 y 230ka. También se incluyen las dataciones mas representativas obtenidas en el trabajo de Viveen (2013) para el sistema de terrazas fluviales (Furna) en el Baixo-Miño (Sistema fluvial Miño-Sil; NO de la Península Ibérica) mediante cosmogénicos (10-Be), así como mediante la estimación de la edad mínima (2\*D0 value; Wintle and Murray, 2006) de las señales OSL y pIR-IRSL. Para cada muestra se incluye el rango de edad obtenido y la altura en metros sobre el nivel del mar actual.

A escala local se ha documentado un nivel de suelo continental azoico procedente de un sondeo submarino realizado en la Ría de Ares (A Coruña; NO de la Península Ibérica) a -20m por debajo del nivel actual del mar, coincidiendo con la etapa continental descrita para la laguna de Doniños (A Coruña; NO de la Península Ibérica), datada en 15ka (AMS-14C) (Vidal-Romaní, 2000) y asociada a una fase fría (Taboada et al., 1999). Este nivel continental ha sido también señalado en otros trabajos en el sector atlántico (Allen, 1999; Thouveny, 1994 y 2000; Granja, 1996), lo que implica que, durante la sedimentación de estos depósitos fluviales, entre los 120 y los 50ka, el nivel de base se situaría, como mínimo, entre -15 o -20m o incluso menos (-30m o -50m por debajo del nivel del mar actual), coincidiendo con un episodio regresivo de origen glacial. Además, al

contrario de lo que ocurre en el suroeste de la Península Ibérica, en el noroeste se ha observado que el descenso de las temperaturas viene acompañado de un incremento de la humedad y precipitaciones, como se propone en el estudio del registro climático local más extenso realizado en Galicia, abarcando los últimos 550ka (Ralsbak et al., 2017). Por tanto, a lo largo de estas épocas frías y regresivas, durante las cuales se depositan los materiales estudiados en el presente trabajo, se produciría, además, un incremento de las precipitaciones y aporte de aguas continentales.

Respecto a la relación entre la edad calculada y la cota relativa al cauce actual, se observan diferencias entre los depósitos pertenecientes al interior de la cuenca del río Mero y los desarrollados en la Península de Sada, si bien, este criterio basado en la altitud no es fiable y pierde consistencia, en primer lugar porque puede acontecer que depósitos de distinta naturaleza situados a alturas diferentes presenten edades similares (Vidal-Romani, 2002) y en segundo lugar, que se hayan podido ver afectados por distintas tasas de levantamiento tectónico, pues la fachada atlántica gallega sufre un levantamiento entre 0.08 y 1mm/año (Viveen, 2013; 2014) y que confieren un comportamiento diferenciado de la evolución de la costa a nivel local, pudiendo existir sedimentos de naturaleza y edad similar pero ubicados a distinta cota. Así, para los primeros, los depósitos desarrollados en la cuenca del río Mero, se cumple el principio de superposición, correspondiéndose las cotas relativas más elevadas con los rangos de edad más antiguos: el depósito de Brexa (MPK1), ubicado a +30m, presenta un rango de edad de  $65 \pm 13$ ka; el de Mesón-Perillo (MPK5) y Vilaboa (MPK8), a +40m, presentan una edad de  $76 \pm 11$ ka y  $85 \pm 12$ ka respectivamente. Si se incluye la muestra de Bastiagueiro (MPK7), situada a +50m, el rango de edad es de  $98 \pm 22$ ka. Este criterio también es válido para las muestras del Río Ulla en Catoira: ABC4, extraída a +30m en Santa Eulalia (Catoira) presenta una edad de  $65 \pm 24$ ka y ABC2 y ABC3 extraídas de un mismo depósito situado a +40m en Borreiros (Catoira), presentan edades de  $71 \pm 13$ ka y  $72 \pm 20$ ka respectivamente. Respecto a la muestra ABC1, perteneciente también en este mismo depósito de Borreiros (Catoira) y con una edad más antigua de  $180 \pm 46$ ka, fue extraída a mayor profundidad que ABC2 y ABC3, dentro de un perfil a lo largo del cual se intercalan distintos paleo-canales y niveles sedimentarios, correspondiéndose con un período de deposición anterior pero a una misma cota (Fig. 9.2).



**Figura 9.2:** Cota relativa (m snma) y rango de edad (ka) para las muestras del río Mero (MPK) y del río Ulla-Catoira (ABC). Las flechas hacen relación a los grupos de depósitos incluidos en el recuadro interno en el cual se describen aquellos que mantienen una relación entre cota relativa y edad siguiendo el principio de superposición. Para los depósitos de Dorneda y Santa Cruz, asumiendo que corresponden al mismo sistema sedimentario, se incrementa la edad con la altura. También ocurre lo mismo para los distintos depósitos desarrollados a lo largo de la cuenca del Río Mero, como el de Bastiagueiro, Vilaboa, Mesón y Bribes, así como para los depósitos desarrollados en la desembocadura del Río Ulla en Catoira (ABC1, ABC2, ABC3, en la localidad de Borreiros, y ABC4 en Santa Eulalia).

Por otra parte, los depósitos datados dentro de la Península de Sada como el de Santa Cruz (MPK2), Dorneda (MPK3) y Mera (MPK4) no siguen este criterio de superposición y relación entre cota relativa y edad absoluta. El nivel de cota relativa establecido para estos depósitos no hace referencia al fondo de la Ría de Coruña, cubierto actualmente por sedimentos finos (arenas y limos) de potencia variable, por lo que, a falta de datos que representen su morfología, el criterio más razonable se basa en el cálculo geométrico de la recta pendiente entre dos afloramientos de un mismo depósito, como es el caso del encontrado en Dorneda (+60m snma) y Santa Cruz (+15m snma) o entre Mera (+10m snma) y Veige (+82m snma; el depósito de Veige está representado en la figura 9.3). Así, se obtienen unos valores para las cotas relativas de +62m para Mera

(MPK4), +58 para Santa Cruz (MPK2) y +100m para Dorneda (MPK3), sobre el nivel del mar actual (snma). Teniendo en cuenta estos resultados, las dos primeras muestras, situadas a cota muy similar, presentan edades muy diferentes, de  $105\pm 23\text{ka}$  para la primera (MPK4; Mera) y de  $58\pm 8\text{ka}$  para la segunda (MPK2; Sta. Cruz), si bien, para la muestra MPK3 (Dorneda), situada a mayor altura relativa, la edad calculada es de  $94\pm 19\text{ka}$ . A este respecto, la línea de costa se ubicaría, como mínimo, en la isóbata actual de -30m por debajo del nivel del mar actual, como se puede observar en la misma figura.

Una razón plausible que justifique que los depósitos situados en la Península de Sada no se ajustan al modelo típico que relaciona cota relativa y edad, y asumiendo una tectónica homogénea en el área, guarda relación con la circunstancia aducida según la cual estos materiales previamente depositados por cauces de mayor entidad, en este caso el Río Mero, han sido sufrido procesos de re-trabajado por cauces secundarios (Vidal-Romaní, 1979; Escuer-Sole y Vidal-Romaní, 1987) —como evidencian aspectos como la proximidad de la divisoria de los cauces que concurren en dirección Este-Oeste en la Península de Sada y la ausencia a lo largo de la misma de materiales característicos como cantos y gravas, que se desarrollaban aguas abajo, por ejemplo en Mera, Santa Cruz y Dorneda. Estas dataciones sustentan la idea según la cual se han producido distintos episodios morfogenéticos para estos depósitos a lo largo del Cuaternario, en contraposición de la hipótesis monogénética expuesta por Nonn (1966).

Por último, a falta de dataciones absolutas para los depósitos hipotéticamente más antiguos y situados a mayor altura en la cuenca del río Mero (Tabeaio, Montecarlo, Atalaya, Balbén, Callobre, Castro de Orto o Viladesuso, entre +140 y +80m snma; Escuer-Sole y Vidal-Romaní, 1987), ora por desaparición, ora por exceder el límite de edad de la propia técnica de datación o alcanzar el umbral de saturación de la señal OSL o pIR-IRSL, y en base a las edades obtenidas para los depósitos datados en los niveles más bajos del Río Mero y Península de Sada, se estarían describiendo episodios correspondientes a una etapa tardía de la formación de la propia cuenca.





**Figura 9.3:** Mapa de la Ría de Coruña y la Ría de Ares y Betanzos representando una etapa regresiva del mar (oscilación glacio-eustática negativa), situando por convenio la línea de costa y el nivel del mar a -30m (por debajo del nivel del mar actual). Los triángulos indican el modo de obtener el dato de cota relativa para los depósitos de Mera (MPK4), Dorneda (MPK3) y Santa Cruz (MPK2) respecto al hipotético fondo de valle fluvial excavado por el Río Mero. Los ángulos obtenidos son de 1.4° (pendiente=3%) para Mera y de 1.8° (pendiente=4%) para Santa Cruz; A la derecha se indica la cota +156m y de +175m sobre el nivel del mar actual (snma), que indica la línea divisoria entre la vertiente este y oeste de la Península de Sada. (Fuente: IHM (2006). Carta náutica N°412-A (Rías de Ferrol, Ares, Betanzos y La Coruña) 1:25.000, VI Edición. Armada Española. Ministerio de Defensa).

## 9.2. Serie eólica.

La señal de luminiscencia OSL o pIR-IRSL extraída de sedimentos eólicos de tipo arenoso, como las dunas analizadas en el presente trabajo de Tesis, presenta un comportamiento y unas características propias que en general son bien conocidas y muy diferenciadas de la que se obtiene a partir de sedimentos fluviales, como un buen blanqueamiento de la señal durante el transporte de los materiales y ausencia de carga residual (debido al fenómeno de blanqueamiento incompleto), así como buenas condiciones de drenaje y clasificación de materiales, etcétera (Jacobs, 2008). Es por ello por lo que, para esta serie eólica conformada por dunas antiguas, se discutirán principalmente los aspectos relacionados con la tasa de radiación anual, las características de las distribuciones y la selección del modelo de edad más adecuado.

### 9.2.1. Tasa de radiación natural ( $DR$ ) para la serie eólica.

La tasa de radiación anual estimada para las muestras de la serie eólica y de las que se extrae la señal OSL, presenta unos valores más acorde con los obtenidos para los depósitos desarrollados sobre sustrato granítico (Tabla 72), con un rango promedio estimado para la señal OSL entre 1.59 y 3.60 Gy/ka para la  $DR_{TOTAL}$  y entre 0.76 y 1.80 Gy/ka para la componente  $DR_{GAMMA}$  (Tabla 59). No obstante, aunque más del 90% de los materiales se corresponden a partículas del tamaño de arena (Gutiérrez-Bécker, 2008), la naturaleza del área de origen de sedimentos y la composición de los materiales que transporta el viento son indeterminables (el área de original de procedencia está ahora cubierta por las aguas del mar). Por otra parte, la única referencia la representa la datación de la duna fósil de Penaboa (A Coruña; NO de la Península Ibérica) conformada por minerales de cuarzo (96%) de tamaño arena, poca presencia de feldespatos y una  $DR$  por debajo de 1 Gy/ka, valores que se relacionan con la antigüedad del depósito y el alto grado de meteorización y lavado de radioisótopos a lo largo del tiempo de enterramiento, estimado en unos 300 ka (Trinidad et al., 2013).

Respecto a las muestras de las que se extrae la señal pIR-IRSL, si bien la componente gamma entra dentro de estos valores típicos, la componente beta se incrementa debido a la auto-irradiación del propio feldespato potásico -por la presencia de  $^{40}\text{K}$  en la red cristalina de este mineral- presentando valores entre 2.32 y 3.01 Gy/ka (a modo de referencia, para la señal OSL medida en cuarzo estos valores no llegan a 1.9 Gy/ka). Si a ello se le suma la contribución de la radiación alfa, se obtienen unos valores que pueden superar los 4 Gy/ka (Tabla 60).

No obstante, el aspecto más relevante es la presencia de desequilibrio en la serie de  $^{238}\text{U}$  para un alto número de muestras, como la de Punta Mortaza (Mortaza2), Xalfas, Bornalle, Corme, Punta Langosteira (Langosteira) y Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1), todas ellas con una reducción en la actividad del  $^{226}\text{Ra}$  respecto al propio  $^{238}\text{U}$  (Tabla 57) y que se puede asociar a una acumulación de uranio en este tipo de depósitos bien consolidados (no hay cementación, pero podrían actuar como un sistema semi-cerrado), más que a una pérdida del radio por lixiviado (Olley, 1999). Independientemente de las causas de desequilibrio, la estimación de la  $DR_{TOTAL}$  se ha calculado a partir de dos datos distintos obtenidos a partir de la actividad de los radioisótopos asumiendo equilibrio y a partir de la misma actividad asumiendo desequilibrio. Así, a partir del valor máximo y el valor mínimo de ambas estimaciones se obtiene un valor promedio que se corresponderá con la propia  $DR_{TOTAL}$ , siendo la desviación típica el propio error asociado a este dato.

### 9.2.2. Estimación de la $De$ y rango de edad para la serie eólica.

Como se ha comentado, la dispersión observada en la distribución de la señal OSL para los sedimentos de tipo eólico no se relaciona con la presencia de una población de alícuotas con una carga residual debido al fenómeno de blanqueamiento incompleto, dando lugar a una sobre-estimación de la dosis equivalente ( $De$ ). Es

por ello por lo que la amplia dispersión observada se asocia a aspectos relacionados con la dosimetría del medio, como apunta el grado de desequilibrio observado, u otros relacionados con una distribución heterogénea de la radiación beta dentro del sedimento, en donde los granos de cuarzo y feldespato reciben dosis no homogéneas. Independientemente del porcentaje de sobre-dispersión estimado, los datos obtenidos siguen distribuciones de tipo normal aportando fiabilidad a las estimaciones obtenidas mediante el modelo de edad central CAM.

#### 9.2.2.1. Muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3).

La muestra Cíes-Alto da Figueira 1 (CAF1) presenta unos datos que se ajustan a una distribución de tipo normal, aún contando una alta proporción de alícuotas que no interpolan (un 40%). Respecto a la  $OD$  estimada, mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  se obtiene un porcentaje del 20%, mientras que, al emplear el método de integración EBG, este porcentaje se reduce hasta el 2%, reduciéndose también el error asociado de las alícuotas incluidas dentro del i.c.95% para este modelo  $CAM_{EBG}$  (Fig. 8.16.1). No obstante, y a pesar de estas diferencias, el rango de edad calculado mediante el modelo  $CAM_{LBG}$  y el modelo  $CAM_{EBG}$ , de  $30 \pm 5$ ka y de  $23 \pm 4$ ka, respectivamente (Tabla 64), se solapan, aspecto que aporta una idea de la escasa contribución de la señal OSL lenta para estas estimaciones. En base a los reducidos porcentajes que presenta la  $OD_{EBG}$ , el rango de edad más fiable será el correspondiente al modelo  $CAM_{EBG}$ , de  $23 \pm 4$ ka. De manera similar, la distribución de datos para la muestra CAF3 también se ajusta a una normal, presentando una proporción de alícuotas que extrapolan por debajo del 10%. Por su parte, y la estimación de la  $OD_{LBG}$  es del  $33 \pm 5\%$ , similar al porcentaje de la  $OD_{EBG}$ , del  $30 \pm 5\%$ . Así, el rango de edad calculado a partir de la estimación de la  $De$  obtenida mediante el método  $CAM_{EBG}$  es de  $15 \pm 3$ ka (Tabla 66).

Por su parte, la distribución de las estimaciones para la muestra Cíes-Alto da Figueira2 (CAF2) empleando el método LBG no presenta un buen ajuste a una normal (Fig. 8.16.2), aunque el porcentaje de alícuotas que no interpolan no supera el 20% (Tabla 63). Respecto a los resultados obtenidos al emplear el método EBG para esta muestra CAF2, existe un alto porcentaje de alícuotas que presentan error en la curva de crecimiento y que no superan el test de reciclaje (con un 50% y un 30%, respectivamente), motivo por el cual no se obtienen datos estadísticamente significativos. Así, con una sobre-dispersión ( $OD_{LBG}$ ) del  $50 \pm 6\%$  (Fig. 8.16.2), el modelo  $CAM_{LBG}$  pierde fiabilidad si bien, el modelo  $MAM_{LBG}$  ofrece un rango de edad de  $9 \pm 2$  (ka) (Tabla 65), incongruente con su disposición estratigráfica, entre las muestras CAF1 y CAF3 (Fig. 7.22). Es por ello por lo que el rango de edad estimado mediante el modelo  $CAM_{LBG}$ , de  $22 \pm 4$  (ka) se presenta como el dato más plausible.

### 9.2.2.2. Muestra de Punta Mortaza (Mortaza2).

La distribución de los datos obtenida al emplear el método de integración LBG se ajusta a una normal y presenta una  $OD_{LBG}$  del  $22 \pm 7\%$  (Tabla 62), si bien, el error relativo está, generalmente, por encima del 15%. No obstante, el cálculo de edad final obtenido mediante la estimación de la  $De$  que ofrece el modelo  $CAM_{LBG}$  es de  $28 \pm 5ka$ . El número de datos válidos al emplear el método EBG es muy reducido por lo que no se obtienen resultados estadísticamente significativos.

### 9.2.2.3. Muestras de Tal y Xalfas.

Para el cálculo de la edad final de la muestra de Tal resultan determinantes las estimaciones obtenidas mediante el método EBG para cada uno de los modelos (CAM, MAM e IEU), obteniéndose resultados coincidentes, llegando a solaparse, e indicando el carácter central de las estimaciones y una distribución de los datos de tipo normal, a pesar de la amplia dispersión y error observados (Fig. 8.16.6). No obstante, mediante el método LBG se obtiene una menor  $OD$  del  $34 \pm 6\%$ , cuyo límite inferior entraría dentro del valor límite de referencia para la utilización del modelo CAM (Olley, 2004), a lo que se suma el buen ajuste a una distribución normal y simétrica, como se puede observar en los histogramas de la misma figura. Es por ello por lo que se opta por la estimación obtenida a partir del modelo  $CAM_{LBG}$ , de  $31 \pm 3ka$  (Tabla 62), coincidiendo con la datación obtenida mediante  $^{14}C$ -AMS en el trabajo realizado por Gutierrez-Becker (2008), para el depósito lacustre de tipo continental subyacente rico en materia orgánica, de edad estimada en  $28.9 \pm 0.5$  (ka B.P.  $1\sigma$ CALPAL) (dato obtenido a partir de la calibración de la edad estimada en dicho trabajo, de  $24.06 \pm 0.36ka$  B.P., sin calibrar) y en el que se hace mención a las estructuras de carga observadas entre de ambos niveles, orgánico y arenoso, asociados a eventos en los cuales los materiales de mayor densidad, en este caso, las arenas transportadas por el viento, se depositan sobre otros materiales sedimentarios no cohesionados como es el caso de los fangos de un lagún costero lo que explicaría el contacto neto entre ambos depósitos. Así, la coincidencia de ambas dataciones corroboraría el proceso -y su magnitud- y que correspondería a un “washover fan” relacionado con un pasillo de tormenta en un cordón dunar durante un episodio de alta energía (eólica) que tuvo lugar hace, aproximadamente, 30.000 años.

Respecto a la muestra de Xalfas, el elevado porcentaje de  $OD$ , por encima del 50% tanto para el método LBG como EBG, restaría fiabilidad al modelo de edad central CAM a favor del modelo de edad mínima MAM. Este incremento de la sobre-dispersión, asumiendo la ausencia del fenómeno de blanqueamiento incompleto depósitos eólicos (Olley, 1998; Duller, 2004; Roberts, 2008; Lancaster, 2008), podría asociarse al grado de desequilibrio observado en las estimaciones de la actividad en la serie de  $^{238}U$  y, por tanto, en la  $DR_{TOTAL}$ , próximo a los  $2Gy/ka$  (Tabla 59), dando lugar a un incremento de la incertidumbre debido a variaciones en la micro-dosimetría del sedimento (Olley, 1999; Thomsen, 2005; Mayya, 2006). Así, en lugar de una muestra en

la que están presentes dos o más poblaciones de grado con distinto grado de blanqueamiento y carga residual de la señal OSL, resultaría más probable que dentro del depósito se estén produciendo tasas de radiación variables que contribuyen de modo diferente a los distintos granos de cuarzo y generando, para un mismo tiempo de enterramiento, una señal OSL distinta, justificándose así el grado de sobre-dispersión estimada. Además, en comparación con el resto de muestras, resulta asumible el rango de edad calculado a partir de las estimaciones obtenidas mediante el modelo  $CAM_{LBG}$ , de  $23 \pm 6$ ka. Por su parte, la edad calculada al emplear el modelo  $MAM_{LBG}$  y  $MAM_{EBG}$  es de  $6 \pm 2$ (ka) y  $5 \pm 1$ (ka), respectivamente, rangos que resultan incoherentes con la formación de estos depósitos descritos, en base a criterios los geomorfológicos, como antiguas dunas trepadoras (Gutiérrez-Becker, 2008) resultando de mayor fiabilidad la estimación que ofrece el modelo  $CAM_{LBG}$ , más acorde con el resto de muestras (TAL, Mortaza2, y las muestras de Cíes-Alto da Figueira -CAF1, CAF2 y CAF3).

#### 9.2.2.4. Muestras Bornalle, Corme, Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) y Punta Langosteira.

La señal pIR-IRSL de los feldespatos se caracterizan por una mayor intensidad pero una contribución de la componente rápida de la señal IRSL más lenta, si se compara con la señal OSL del cuarzo (Buylaert et al, 2012), y con un umbral de saturación de la señal IRSL mayor (Wallinga et al, 2000). Así, y como se comentó en los principios de luminiscencia, se pueden alcanzar rangos de edad más antiguos (Martins et al., 2010; Thiel et al., 2011; Li et al., 2013; ; Viveen, 2013; Schmidt et al., 2014) una vez establecida la adecuación del protocolo SAR modificado para feldespato y del cual se extrae la señal pIR-IRSL a alta temperatura ( $IRSL_{290}$ ), empleando un tratamiento térmico o *pre-heat* también a alta temperatura ( $320^{\circ}C$ ; 60s) (Kars et al., 2014).

Para esta señal pIR-IRSL extraída a partir del feldespato potásico presente en las muestras de Bornalle, Corme, Punta Langosteira y Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1), no se observa atenuación anómala de la señal IRSL a alta temperatura ( $IRSL_{290}$ ), al contrario de lo que sucede, generalmente, con la señal IRSL normal o a baja temperatura ( $IRSL_{50}$ ) (Spooner, 1994; Huntley and Lamothe, 2001). Tampoco se observa para esta señal pIR-IRSL una carga residual debido al fenómeno de blanqueamiento incompleto, más típico de depósitos fluviales (Porat et al., 2001). Es por ello por lo que la estimación de la *De* a partir de la media ponderada calculada mediante el modelo CAM, con un error asociado inferior al 5% para todas estas muestras y con distribuciones que tienden a seguir una curva de tipo normal -a excepción única de la muestra de Bornalle- de lugar a un calculo de edad fiable de  $62 \pm 4$ (ka) para la muestra de Corme,  $122 \pm 6$ (ka) para la muestra de Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1),  $131 \pm 7$ (ka) para la muestra de Punta Langosteira y, finalmente,  $165 \pm 9$ (ka) para la muestra de Bornalle.

## 9.2.2.5. Rangos de edad finales para la serie eólica.

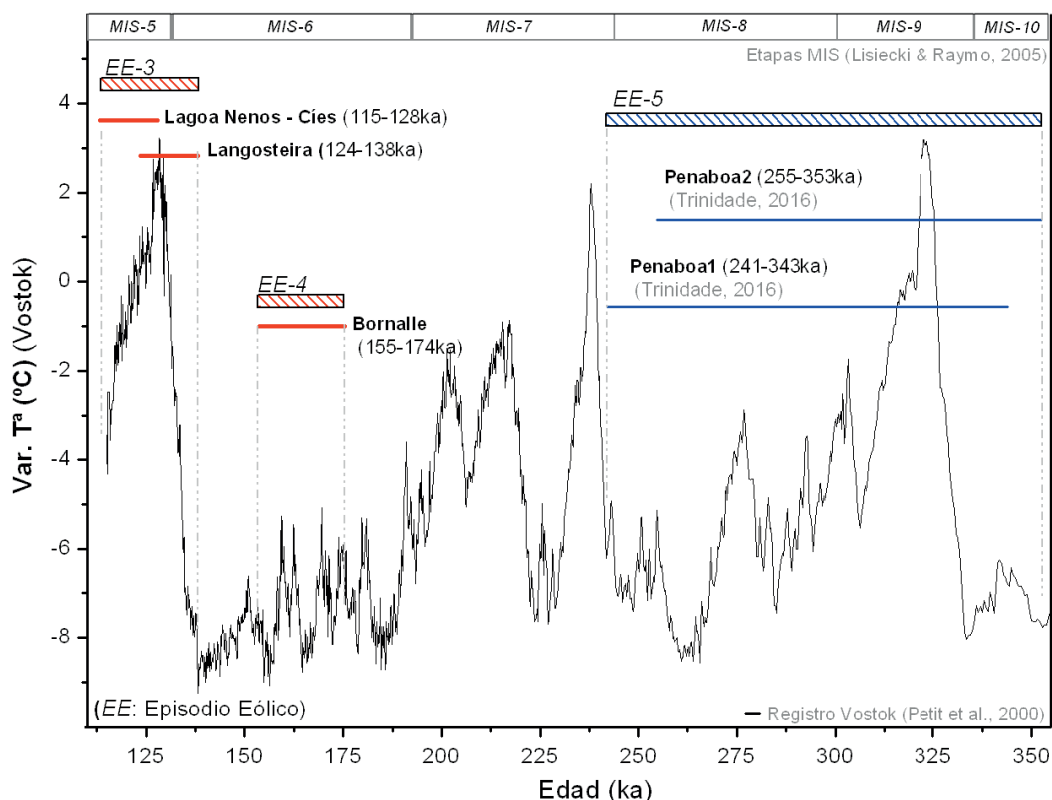
En la tabla siguiente (Tabla 75) se describen los rangos de edad más coherentes calculados para la serie eólica, y a partir de los cuales se pueden determinar los distintos episodios que han dado lugar a la formación de estos depósitos eólico-costeros. Así, el episodio más reciente, ubicado entre los 15ka y 30ka, daría lugar a los depósitos correspondientes a las muestras de Cíes-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3), Punta Mortaza (Mortaza2), Xalfas y TAL. Posteriormente se produciría un segundo episodio, ubicado en torno a los 60ka, representado por la muestra de Corme. El siguiente episodio se remontaría hasta los 120ka o 130ka (muestras de Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) y Punta Langosteira) y, al menos, un cuarto episodio situado hace 165ka, como se observa con la muestra de Bornalle.

**Tabla 75.** Rango de edad final calculado (en ka=1000a) indicando el tipo de señal (OSL o pIR-IRSL), el modelo de edad empleado (CAM) y el método de integración de la señal (LBG o EBG). Se incluyen dataciones de referencia de la serie eólica para el NO de la Península Ibérica.

Muestras (modelo-sígnal)	Edad (ka)	Otras edades de referencia
<b>Cíes - Alto Figueiras1</b> (CAF1) (CAM <sub>EBG</sub> – OSL)	23,49 ± 3,64	
<b>Cíes - Alto Figueiras2</b> (CAF2) (CAM <sub>LBG</sub> – OSL)	22,31 ± 3,92	
<b>Cíes - Alto Figueiras3</b> (CAF3) (CAM <sub>EBG</sub> – OSL)	15,50 ± 2,63	
<b>Mortaza2</b> (CAM <sub>LBG</sub> – OSL)	28,71 ± 4,81	
<b>Xalfas</b> (CAM <sub>LBG</sub> – OSL)	22,91 ± 6,49	
<b>TAL</b> (CAM <sub>LBG</sub> – OSL)	30,98 ± 3,66	Edad calibrada C-14: 28,9±0,50 kaB.P. 1σ CALPAL (24,06±0,36 kaB.P.; Gutiérrez- Becker, 2008)
<b>Bornalle</b> (CAM <sub>LBG</sub> – pIR-IRSL)	164,98 ± 9,76	Edad calibrada C-14: 26,9±0,64 ka B.P. 1σ CALPAL (22,30±0,30 kaB.P.; Gutiérrez- Becker, 2008)
<b>Corme</b> (CAM <sub>LBG</sub> – pIR-IRSL)	62,17 ± 3,79	Edad calibrada C-14: 26,4±0,60 ka B.P. 1σ CALPAL (22,00±0,30 kaB.P. ;Gutiérrez- Becker, 2008)
<b>Cíes – Lagoa dos Nenos</b> (CLN1) (CAM <sub>LBG</sub> – pIR-IRSL)	121,96 ± 6,19	
<b>Langosteira</b> (CAM <sub>LBG</sub> – pIR-IRSL)	131,35 ± 6,88	
Otras muestras		
<b>Penaboa</b>		292±51ka y 304±49ka (OSL; Trinidad et al.,2013)

#### 9.2.2.6. Correlación entre la serie eólica y las curvas climáticas globales.

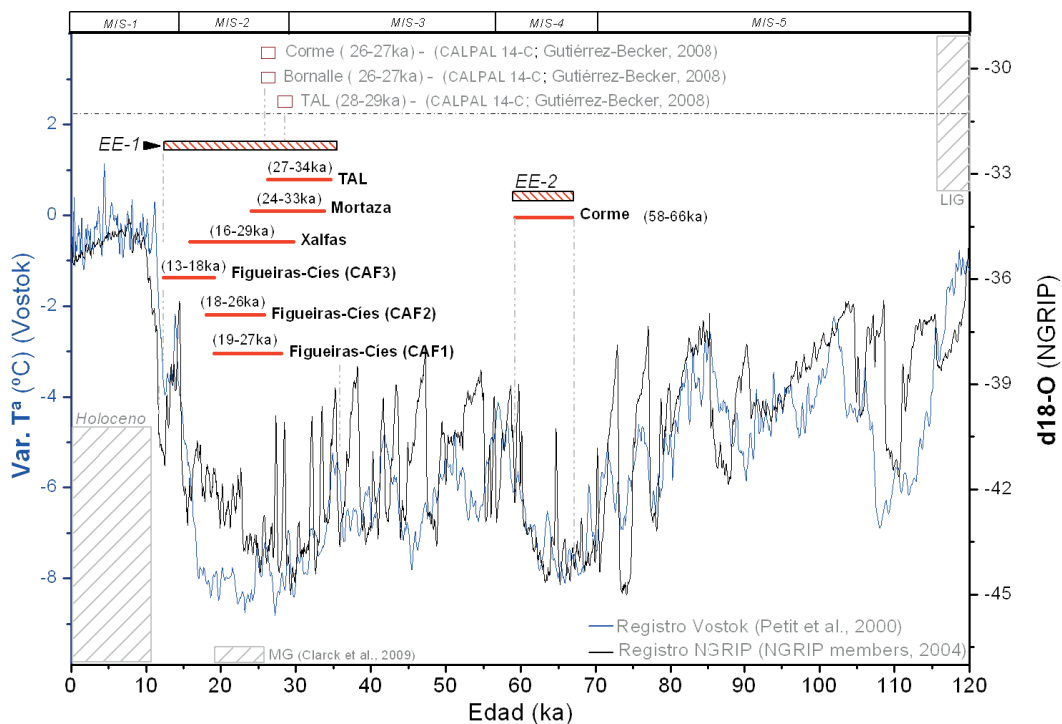
Los depósitos datados pertenecientes a la serie eólica muestreada a lo largo del litoral atlántico en Galicia (NO de la Península Ibérica) nos permiten establecer, en base a las dataciones obtenidas en esta Tesis doctoral, hasta cinco episodios. En las figuras (Fig. 9.4 y 9.5) se representan todos estos episodios eólicos (EE5, EE4, EE3, EE2 y EE1), comparándolos con la curva climática que representa las variaciones globales de las temperaturas que ha experimentado la Tierra en los últimos 350ka, a partir del registro de Vostok (Petit et al., 1999). Así, y como se puede observar en la misma figura, existen dos depósitos (Penaboa I y Penaboa II) cuya datación (Trinidad, 2013) los sitúa antes del último periodo interglaciar (LIG: 116-128ka; Cohen and Gibbard, 2011) dando lugar al episodio eólico datado más antiguo de la serie (EE5) registrado en la costa de toda la Península Ibérica, entre 350ka y 240ka, y caracterizado, además, por un descenso de la temperatura global desde +2°C hasta -8°C a lo largo de 100ka -si bien, el comienzo del depósito coincide con un aumento del mismo orden durante los primeros 30ka. El siguiente episodio (EE4), representado por la muestra de Bornalle y ya datado en el presente trabajo entre 175 y 155ka, se asocia a bajas temperaturas y oscilaciones entre -5°C y -8°C. Posteriormente, el episodio eólico EE3 estaría representado por las muestras de Punta Langosteira, con una edad entre 138 y 124ka, y Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1), con una edad entre 128ka y 115ka, asociado a una etapa en donde se produce un aumento de la temperatura desde -9°C hasta -1°C, aproximadamente, entre 140 y 130ka. Así, el comienzo de este episodio coincide con el final del estadio isotópico MIS6, caracterizado por un descenso en las temperaturas globales entre -4°C y -9°C, y el comienzo de la etapa interglaciar MIS 5e (Liecki and Raymo, 2005), prolongándose a lo largo de la misma, hasta los 110ka, momento en el cual se produce un descenso de la temperatura media global de -7°C. Por su parte, el episodio eólico EE2 estaría representado por una única muestra, Corme, con una edad entre 66 y 56ka, correspondiéndose con una variación térmica entre -8°C y -4°C, asociada a la etapa MIS4, sin que se observen grandes diferencias entre la curva climática de Vostok (Petit et al., 2000) y el registro de Groenlandia NGRIP (NGRIP members, 2004), como se puede observar en la figura (Fig. 9.5).



**Figura 9.4:** Representación de la variación de temperatura global estimada a partir del registro de Vostok (Petit et al., 2000) incluyendo el rango de edad de las dataciones obtenidas en el presente trabajo para las muestras de Lagoa dos Nenos en Cies (CLN1) y Langosteira, asignadas por convenio al episodio eólico tercero (EE3), y para la muestra de Bornalle, asignada al episodio eólico EE4. También se incluyen los resultados obtenidos en la datación absoluta para las muestras de Penaboa1 y Penaboa2 (Trinidade et al., 2013) asignadas al episodio eólico más antiguo de la serie (EE5). En la parte superior de la figura se incluyen las etapas MIS (Marine Isotope Stage) entre los 110 y 360ka a partir de los datos de Lisiecki y Raymo (2005).

En la misma figura (Fig. 9.5) también se representan el episodio más reciente de la serie datada en el presente trabajo (EE1) comprendido entre los 34ka y 13ka, siendo el mejor representado hasta el momento en la costa gallega, incluyendo las muestras de Cies-Alto da Figueira ((CAF1, CAF2 y CAF3), Xalfas, Mortaza y Tal, y ha sido reconocido en la costa norte portuguesa y datado mediante OSL entre 25ka y 14ka (Thomas et al., 2008). Esta coincidencia espacio-temporal revela la importancia de estos eventos eólicos en los momentos previos a la transición holocena y para la cual se observa un primer periodo de descenso de temperaturas entre -5°C y -8°C alrededor de los 30ka, para pasar a experimentar un incremento desde los -8°C hasta los -4°C alrededor de los 17ka y experimentando un pico máximo de -2°C entre los 10 y 15ka.





**Figura 9.5:** Representación de la variación de temperatura global estimada a partir del registro de Vostok (Petit et al., 2000) (eje Y izquierdo, en azul) y de las variaciones en los isotópicos de 18-O para el registro de hielo NGRIP (NGRIP members, 2006; Anderson, 2006) (eje Y derecho, en negro) incluyendo el rango de edad de las dataciones obtenidas en el presente trabajo para las muestras de Corme, asignado al episodio eólico EE2 y para las muestras TAL, Mortaza, Xalfas y las muestras extraídas en Cies-Alto da Figueira (CAF1, CAF2 y CAF3) asignadas todas ellas al episodio eólico más reciente (EE1) de esta serie. En la parte superior de la figura se incluyen las etapas MIS hasta los 120ka a partir de los datos de Lisiecki y Raymo (2005) y debajo las dataciones mediante AMS-14C realizadas en algunos depósitos orgánicos relacionados con los depósitos eólicos de Corme, TAL y Bornalle (Gutiérrez-Becker, 2008). En la parte inferior se indica la ubicación del último máximo glaciar (MG; Clark et al, 2009) y del periodo Holoceno.

### 9.3. Aspectos geodinámicos asociados a los depósitos fluviales y la serie eólica.

En las figuras anteriores, en las cuales se representaba el rango de edad de los depósitos fluviales y eólicos datados en el presente trabajo y se comparaban los episodios de deposición fluvial y eólica con la curva climática de Vostok (Fig. 9.1, 9.4, 9.5), se puede observar una tendencia que relaciona enfriamiento global de la Tierra con el desarrollo de estos procesos de sedimentación. Existe además una relación entre los episodios eólicos y los distintos episodios glaciales reconocidos a nivel local y regional y descritos en la tabla (Tabla 76). En ella se establecen por convenio y en base dataciones absolutas, una secuencia de grupos (GR1, GR2, GR3, GR4 y GR5) que hacen referencia a estos episodios glaciales existentes y en los que cabe destacar aquellos realizados en el NO de la Península Ibérica, como es el caso de las dataciones realizadas en Galicia y el norte de

Portugal, en Serra de Queixa-Invernadoiro y Serra do Gerês-Xurés (Vidal-Romaní et al., 2015), en A Gudiña (Ourense) y en O Caurel- Lagoa da Lucenza-(Lugo) (Vidal-Romaní et al., 2010; Jalut et al., 2010) o Manzaneda (Ourense) (Vidal-Romaní et al., 1999). También en el límite nororiental, se hace referencia a las dataciones, mucho mas recientes, realizadas mediante  $^{10}\text{Be}$  en el lago de Sanabria, en Zamora, en donde también aplican dataciones mediante radiocarbono y OSL (Rodríguez-Rodríguez et al., 2014) o dataciones mediante uranio/torio (Domínguez-Villar et al., 2013), así como las dataciones realizadas en Picos de Europa (Serrano et al., 2012). Ya a escala regional, hay dataciones en el Sistema Central (Palacios, 2016; Domínguez-Villar, 2013), Sierra Nevada (Palacios, 2016) o en Pirineos (Quinif and Maire, 1996; Delmas et al., 2011; Turu et al., 2011 y 2016; Peña et al., 2004; Pallás et al., 2006 y 2010; Sancho, et al. 2011). Existen otros trabajos realizados en Europa y a lo largo del Mediterráneo, como en el Monte Pindus en Grecia (Hughes, 2011) o en los Apeninos (Giraudi y Giaccio, 2015; 2016), incluidos en una compilación realizada por Hughes and Woodward (2016) y en Turu (en revisión), o aquellas dataciones realizadas mediante OSL y pIR-IRSL en los Alpes (Bickel, 2015) o en el Báltico (Hardt et al, 2016) que presentan unos resultados que se adecuan a los episodios de glaciario regional establecidos si bien, debido a la dinámica propia de cada zona o región, la correlación de estas dataciones con los fenómenos locales de deposición eólica en la fachada atlántica de la Península Ibérica -y a falta de un mayor número de datos a escala local- es, como en el caso del grupo GR-5, simbólica.

Esta relación entre depósitos eólicos y glaciario, al menos a nivel local, en Serra da Queixa (Galicia) y Serra do Gêrez (Norte de Portugal) (Vidal-Romaní et al., 2015), muestra coincidencia de edad en distintas dataciones realizadas a nivel regional, lo que apoya la hipótesis según la cual, el descenso de las temperaturas globales y el aumento del volumen de hielo glaciar, se correlaciona con los episodios de regresión marina que dejan al descubierto extensas zonas de plataforma continental recubiertas de arenas sobre los que actuará la erosión eólica, transportándolas hacia el interior en forma de trenes de dunas (Vidal-Romaní, 1974; 1999; 2000; López-Cancelo, 2004; Gutiérrez-Becker, 2008) (Vidal-Romaní, 1999; Granja et al., 1999).

Por otra parte, en la figura (Fig. 9.6) se representa el conjunto de depósitos fluviales (f-MERO y f-ULLA) y los distintos episodios eólicos datados en el presente trabajo (EE1, EE2, EE3, EE4 y EE5), así como los episodios de glaciario determinados anteriormente y su comparación con las curvas climáticas mundiales establecidas a partir del registro de hielo de Vostok (Petit et al., 2000) y a partir de las variaciones en isótopo pesado de oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ) de foraminíferos bentónicos marinos (Lisiecki and Raymo, 2005), junto con las variaciones promedio estimadas en nivel del mar (Waelbroeck et al, 2002) para los últimos 420ka.

En la misma figura también se representa la señal isotópica ( $^{18}\text{O}$ ) analizada a lo largo de las series de deposición o crecimiento de los espeleotemas de las cuevas calcáreas (sistemas cársticos) de la Sierra do Courel (Cordillera Cantábrica; Lugo; NO de la Península Ibérica) (Railsback et al, 2017) y que se extiende hasta hace 550ka. A partir de este registro se asocia el desarrollo de estas formaciones a episodios interglaciares

que, como se puede observar en la misma figura (Fig. 9.6; registro ESP-05 y ESP-06 en la curva superior), se sitúan entre los distintos episodios de sedimentación eólica y fluvial, a excepción de la muestra Cíes-Lagoa dos Nenos (CLN1) datada en el rango 115-128ka, y correspondiente al episodio EE3. Además, la señal isotópica ( $^{13}\text{C}$ ) registrada en estos espeleotemas ofrece información que hace referencia a un clima cuya humedad se incrementa a medida que descienden las temperaturas. Esta tendencia, que asocia frío y humedad, también se observa en los espeleotemas analizados en la Sierra de Gredos (Sistema Central; Península Ibérica) (Domínguez-Villar et al., 2013). A ello cabe añadir que el registro polínico analizado en los sondeos de la plataforma continental sumergida en donde drenan sus aguas los cursos fluviales más importantes a lo largo de la fachada atlántica peninsular, como el sistema Miño-Sil, el río Duero o el río Tago (Fletcher et al., 2010), registran diferencias muy marcadas en el tipo de vegetación predominante. Así, mientras que en el suroeste, y coincidiendo con los resultados obtenidos en el mar de Alborán (Mar Mediterráneo; sur de la Península Ibérica), el descenso de las temperaturas viene acompañado por la presencia de vegetación xerofítica de tipo esteparia-desértica, en el noroeste peninsular estas etapas frías vienen acompañadas de herbáceas y brezales, representativos de un clima más húmedo, asociándose, para el NO de la Península Ibérica, frío y precipitaciones.

Como se puede observar en los registros de Vostok o en los foraminíferos marinos representados, y a lo largo de los últimos 500ka (Fig. 9.6), los periodos de tiempo durante los cuales se observa una tendencia hacia el enfriamiento e incremento del glaciario son más prolongados que aquellas etapas durante las cuales la temperatura tiende a aumentar, pudiéndose afirmar en base a estos datos que, en comparación con las épocas frías, las pulsaciones interglaciales son más breves y más pronunciadas. Además, durante estas épocas frías en donde se produce un descenso de las temperaturas gradual y paulatina, se produciría, a partir de los datos registrados en los espeleotemas en el NO de la Península Ibérica, un incremento de la humedad y de las precipitaciones en esta región. La ubicación en el tiempo de los depósitos fluviales, en función de las dataciones obtenidas en el presente trabajo, coincidirían con estas últimas.

**Tabla 76.** Episodios glaciares clasificados en grupos (GR1, GR2, GR3, GR4 y GR5) a partir de las dataciones realizadas en cada uno de los trabajos citados, incluyendo el rango de edad obtenido y la técnica de datación absoluta empleada en cada uno de ellos.

<i>Episodios</i>	<i>Localización</i>	<i>Rango edad (ka)</i>	<i>técnica datación</i>	<i>Referencia bibliográfica</i>
<b>GR-1</b>	Queixa-Invernadoiro			
	Gerêz-Xurés	16-28	21-Ne; 10-Be	Vidal-Romaní et al., 2015
	Manzaneda- Lagoa Grande	13-14	14-C	Vidal-Romaní et al., 1999
	Cordillera Cantábrica	15-48	14C	Jalut et al, 2010
	Picos de Europa	34-36	OSL	Serrano et al., 2012
	Lago de Sanabria	15-19	10-Be; 14C; OSL	Rodríguez-Rodríguez et al., 2014
	Sistema Central	25-27	10-Be	Dominguez-Villar, 2013
	Sistema Central	15-32	36-Cl	Palacios et al., 2016
	Sierra Nevada	13-32	36-Cl	Palacios et al., 2016
	Pirineos	15-27	14-C	Delmas et al., 2011
	Pirineos	15-35	10-Be	Delmas et al., 2011
	Pirineos	20-43	OSL	Turu, 2008
<b>GR-2</b>	Queixa-Invernadoiro;			
	Gerêz-Xurés	80-85	21-Ne; 10-Be	Vidal-Romaní et al., 2015
	Lucenza	85-90	21-Ne; 10-Be	Vidal-Romaní et al., 2010
	Pirineos	70-80	10-Be	Delmas et al., 2011
	Pirineos	50-60	OSL	Sancho et al., 2011
	Pirineos	50-75	OSL	García-Ruiz, 2013
	Pirineos	80-85	OSL	Peña et al., 2004
	Pirineos	70-83	10-Be	Pallás et al., 2010
	Monte Pindus (Grecia)	70-90	U/Th	Hughes, 2011
	Alpes	77-81	U/Th	Untersweg et al., 2012
<b>GR-3</b>	Queixa-Invernadoiro ;			
	Gerêz-Xurés	130-150	21-Ne; 10-Be	Vidal-Romaní et al., 2015
	Pirineos	140-160	OSL	Peña et al., 2004
	Pirineos	120-125	10-Be	Delmas et al., 2011
	Apeninos	144-166	39/40Ar	Giraudi y Giaccio, 2015;2016
	Alpes	140-170	pIR-IRSL	Bickel, 2015
	Alpes	130-180	OSL	Preusser and Schultz, 2004
<b>GR-4</b>	Queixa-Invernadoiro ;			
	Gerêz-Xurés	220-255	21-Ne; 10-Be	Vidal-Romaní et al., 2015
	A Gudiña	220-300	21-Ne	Vidal-Romaní et al.,2010
	Picos de Europa	290-300	U/Th	Villa et al., 2013
	Pirineos	210-240	21-Ne	Quinif and Maire, 1996
<b>GR-5</b>	Apeninos	455-459	39/40Ar	Giraudi y Giaccio, 2015;2016
	Monte Pindus (Grecia)	423-478	U/Th	Hughes, 2011

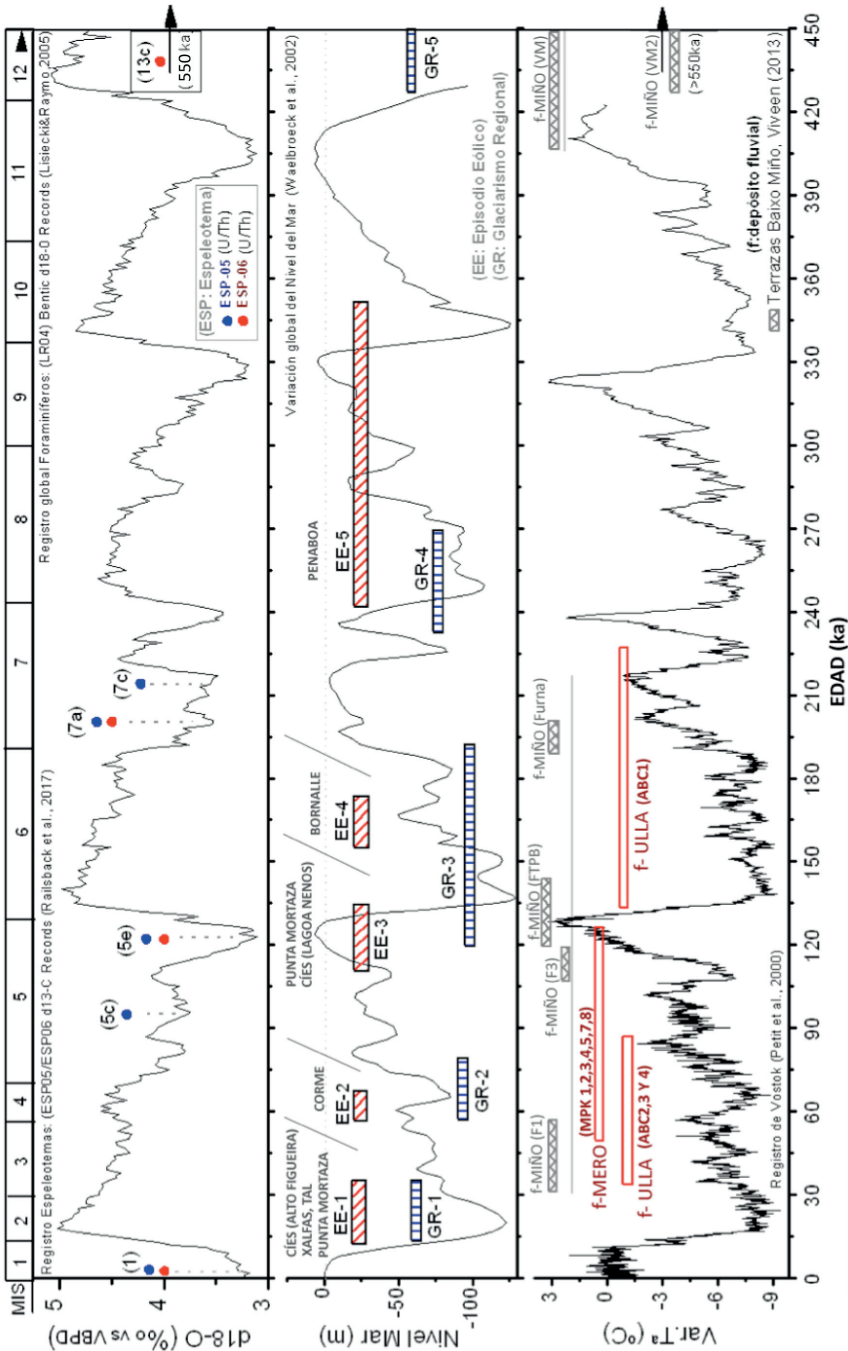


Figura 9.6 : Panel comparativo de la variación de temperatura estimada (en °C) a partir de los datos isotópicos registrados en los testigos de hielo de Vostok (Pettit et al., 2000) durante los últimos 420ka, de las oscilaciones eustáticas globales estimadas (Waelbroeck et al., 2002) y las variaciones isotópicas en foraminíferos bentónicos registradas en el testigo oceánico LR04 incluyendo las etapas MIS (Lisiecki and Malmgren, 2005). Se incluyen las dataciones obtenidas en los depósitos fluviales de la cuenca del Río Mero-Península de Sada (muestras MPK1 y Catoira (ABC1, ABC2, y ABC4), las dataciones de las terrazas del Baixo Miño (Viveen, 2013) y el rango de edad de los distintos episodios eólicos (EE) establecidos a partir de las dataciones obtenidas para la serie eólica en el presente trabajo. También se hace referencia a los distintos episodios glaciares regionales (GR) establecidos a partir de las dataciones obtenidas en diferentes estudios y compendios (Vidal-Romani et al., 2015; Hughes et al., 2016; Turu et al., en revisión). Por último, se incluyen los episodios interglaciares registrados en los espeleotemas ES05 y ES06 datados dentro de los últimos 550ka en el NO de la Península Ibérica (Ralsback et al., 2017).

Teniendo en cuenta estos aspectos climáticos que relacionan frío y glacio-eustasia a nivel global, y humedad y precipitaciones a nivel local a medida que descienden las temperaturas durante extensos periodos de tiempo, se puede entender los sucesivos episodios de erosión fluvial que se producen de manera no continuada, movilizandolos a lo largo del cauce de los ríos los sedimentos formados a partir de las litologías que estos encuentran en su camino hacia el mar. En lo que respecta a la cuenca del río Mero, esta se desarrolló sobre un sustrato conformado por esquistos con intercalaciones de cuarcita, ya alterado previamente, y del cual proceden las gravas de cuarcita, limos y arenas que forman parte de los depósitos datados (ver apartado 2.1 y 2.2) en esta Tesis doctoral. Como se propone en alguno de los estudios realizados en diversas cuencas en el Himalaya (Dingle et al. 2017) los materiales que persisten durante tramos más extensos de la cuenca son aquellos cuya litología corresponde a las rocas más resistentes, destacando las cuarcitas sobre el resto como viene ocurriendo en la cuenca del río Mero o en cuencas mucho más extensas como la conformada por el sistema fluvial Miño-Sil (Viveen, 2013) en donde también las cuarcitas conforman las terrazas mejor conservadas de todos los ríos gallegos. Esto es así hasta el punto de que no se observa existencia de terrazas en aquellos ríos que no atraviesan afloramientos cuarcíticos, o al menos afloramiento de cuarzo de una cierta entidad, lo cual justifica la escasísima presencia y entidad de depósitos cuando los cauces atraviesan afloramientos graníticos -generalmente alterados y que dan depósitos de granulometrías muy finas, fácilmente edafizables y, por tanto, difíciles de reconocer a medida que se prolonga el tiempo transcurrido, como ocurre en la zona granítica de la cuenca estudiada en el presente trabajo.

Por su parte, los episodios eólicos se generarían, en base a las dataciones calculadas en el presente trabajo, a medida que se pasa de una pulsación interglacial con un nivel del mar más elevado hacia una etapa caracterizada por un descenso de las temperaturas, justificando la idea, ya comentada, a partir de la cual cuando el agua queda retenida en forma de hielo en los casquetes glaciares en las épocas frías a lo largo del Cuaternario se produce un retroceso de las aguas oceánicas que deja al descubierto áreas con materiales sobre los cuales el viento puede ejercer su influencia, transportándolos hacia el continente a medida que se avanza hacia una nueva pulsación interglacial, dando lugar a los distintos depósitos que conforman la serie eólica datada.

#### 9.4. Bibliografía.

- Allen, J.R.M.; Brandt, U.; Brauer, A.; Hubberten, H.-W.; Huntley, B.; Keller, J.; Kraml, M.; Mackensen, A.; Mingram, J.; Mingram, J.; Negendank, J.M.; Nowaczyk, N.R.; Oberhänsli, H.; Watts, W.A.; Wulf, S.; Zolitschka, B. (1999) Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature* 400, 740-743.
- Andersen, K. K.; Azuma, N.; Barnola, J.-M.; Bigler, M.; Biscaye, P.; Caillon, N.; Chappellaz, J.; Clausen, H.B.; Dahl-Jensen, D.; Fischer, H.; Flückiger, J.; Fritzsche, D.; Fujii, Y.; Goto-Azuma, K.; Grønvold, K.; Gundestrup, N.S.; Hansson, M.; Huber, C.; Hvidberg, C.S.; Johnsen, S.J.; Jonsell, U.; Jouzel, J.; Kipfstuhl, S.; Landais, A.; Leuenberger, M.; Lorrain, R.; Masson-Delmotte, V.; Miller, H.; Motoyama, H.; Narita, H.; Popp, T.; Rasmussen, S.O.; Raynaud, D.; Rothlisberger, R.; Ruth, U.; Samyn, D.; Schwander, J.; Shoji, H.; Siggard-Andersen, M.-L.; Steffensen, J.P.; Stocker, T.; Sveinbjörnsdóttir, E.; Svensson, A.; Watanabe, O.; Wilhelms, F.; White, J.W.C. (2004) High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431; 147-151.
- Aitken, M.J. (1990) Science-based dating in archaeology. Longman, London.
- Aitken M.J. (1998) An Introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press.
- Arnold, L.J.; Roberts, R.G., (2009) Stochastic modelling of multi-grain equivalent dose (De) distributions: implications for OSL dating of sediment mixtures. *Quaternary Geochronology* 4, 204-230.
- Bailey, R. M. & Arnold, L. J. (2006) Statistical modelling of single grain quartz De distributions and an assessment of procedures for estimating burial dose. *Quaternary Science Reviews* 25, 2475–2502.
- Bailey, R.M.; Smith, B.W. and Rhodes, E.J. (1997) Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL. *Radiations Measurements* 27, 123-136.
- Baltuille, J.M.; Becker-Platen, J.D.; Benda, L. and Ivanovic Calzaga, Y. (1992) A contribution to the subdivision of the Neogene in Spain using Palynology. *Newsletters n Stratigraphy*, 27, 41-57.
- Barrón, E. y Santos-Fidalgo, L. (1997) Síntesis paleobotánica de las cuencas terciarias de Galicia (En: Libro de Resúmenes y Excursiones, XIII Jornadas de Paleontología de la Sociedad Española de Paleontología: Fósiles de Galicia. Grandal Dáglade, A.; Gutiérrez-Marco, J.C. y Santos-Fidalgo, L. (Eds.). Universidade da coruña. A Coruña. pp. 19-21.
- Berggren, W.A. (1987) Neogene chronology and chronostratigraphy new data. *Ann. Inst. Geol. Publ. Hungar* 70, 9-41.
- Bickel, L.; Lüthgens, C.; Lomax, h.; Fiebig, M. (2015) Luminescence dating of glaciofluvial deposits linked to the penultimate glaciation in the Eastern Alps. *Quaternary International*, 357, 110-124.
- Bishop, P.; Muñoz-Salinas, E.; MacKenzie, A.B.; Pulford, I.; McKibbin, J. (2011) The character, volume and implications of sediment impounded in mill dams in Scotland: the case of the Baldernock Mill dam in East Dunbartonshire. *Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc. Edin.* 101, 97-110.
- Boyle, R.W. (1982) Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. Elsevier, New York, 489pp.
- Buylaert, J.-P.; Jain, M.; Murray, A.S.; Thomsen, K.J.; Thiel, C.; Sohbati, R. (2012) A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas* 41, 435-451
- Chaline, J. (1982) El Cuaternario. La historia humana y su entorno. Akal editor, 312 pp.
- Cohen, K.M. and Gibbard, P.I. (2011) Regional chronostratigraphical correlation table for the last 270,000 years. Europe - North of the Mediterranean. International Union for Quaternary Research.
- Colls, A. E., Stokes, S., Blum, M. D. & Straffin, E. (2001) Age limits on the Late Quaternary evolution of the upper Loire River. *Quaternary Science Reviews* 20, 743–750.
- CSN (2000) Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural. Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid.

- Cunningham, A. C. and Wallinga, J. (2010) Selection of integration time intervals for quartz OSL decay curves, *Quaternary Geochronology* 5, 657–666.
- Cunha, P.P.; Martins, A.A.; Huot, S.; Murray, A.; Raposo, L. (2008) Dating the Tejo river lower terraces in the Rodão area (Portugal) to assess the role of tectonics and uplift. *Geomorphology* 102, 43–54.
- Delmas, M.; Calvet, M.; Gunnell, Y.; Braucher, R. & Bourlès, D. (2011) Palaeogeography and  $^{10}\text{Be}$  exposure-age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 305; 109–122.
- Dingle, E.H.; Attal, M.; Sinclair, H.D (2017) Abrasion set-limits on Himalayan gravel flux. *Nature* 544, 471–474
- Domínguez-Villar, D.; Carrasco, R.M.; Pedraza, J.; Gheng, H.; Edwards, R-L- and Willenbring, J.K. (2013) Early maximum extent of paleoglaciers from Mediterranean mountains during the last glaciation. *Scientific Reports*, 3, 2034.
- Duller, G. A. T. (1994) Luminescence dating of poorly bleached sediments from Scotland. *Quaternary Science Reviews* 13, 521– 524.
- Duller, G. A. T.; Bøtter-Jensen, L.; Murray, A.S. (2000) Optical dating of single sand-sized grains of quartz: sources of variability. *Radiation Measurements* 32, 453–457.
- Duller, G. A. T. (2004) Luminescence dating of Quaternary sediments: Recent advances. *Journal of Quaternary Science* 19, 183–192.
- Duller, G.A. (2008) Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating. *Boreas* 37, 589–612.
- Escuer-Sole, J. y Vidal-Romaní, J.R. (1987) Facies y modelo local de los depósitos aluviales de la cuenca del río Mero y península de Sada (A Coruña, Galicia, NW Spain). *Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 11, 69–83.
- Feathers, J.K. and Pagonis, V. (2015) Dating quartz near saturation – Simulations and application at archaeological sites in South Africa an South Carolina. *Quaternary Geochronology* 30, 416–421.
- Ferrus, B. (1998) Análisis de Cuenca y relaciones tectónica-sedimentación en la Cuenca de As Pontes (Galicia). *Universitat de Barcelona*. Tesis doctoral.
- Fletcher, W.J.; Sánchez-Goñi, M.F.; Allen, J.R.M.; Cheddadi, R.; Combarieu-Bebout, N.; Huntley, B.; Lawson, I.; Londeix, L.; Magri, D.; Margari, V.; Müller, U.C.; Naughton, F.; Novenko, E.; Roucoux, K.; Tzedakis, P.C. (2010) Millennial-scale variability during the last glacial in vegetation records from Europe. *Quaternary Science Reviews*, 29; 2839–2864
- Fuller, I. C.; Macklin. M. G.; Lewin, J.; Passmore, D. G. & Wintle, A. G. (1998) River response to high-frequency climate oscillations in southern Europe over the past 200ky *Geology* 26, 275–278.
- Galbraith, R.F.; Roberts, R.G.; Laslett, G.M.; Yoshida, H.; Olley, J.M. (1999) Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I. Experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41:339–64.
- Gascoyne, M. (1992) Geochemistry of the actinides and their daughters. In: Ivanovich, M., Harmon, R.S. (eds.) *Uranium-series disequilibrium: applications to Earth, marine, and environmental sciences*. Clarendon Press, Oxford, pp. 34–61.
- Godfrey-Smith, D.I.; Huntley, D.J. and Chen, W.-H (1988) Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews* 7, 373–380.
- Granja, H.M.; Carvalho, G.S.; De Groot, T.A.M.; Soares, A.M.; Parish, R. (1996) Geochronology and the recent geomorphological evolution of the northwest coastal zone of Portugal. In: *Partnership in Coastal Zone Management*, Taussik, J. & J. Michell (eds) Samara Publishing Limited. Cardigan, UK. 297–308.



- Granja, H.; Ribeiro, I.C.; Soares de Carvalho, G.; Senos-Matías, M. (1999) Some Neotectonic indicators in Quaternary formations of the northwest coastal zone of Portugal. *Physics and Chemistry of the Earth* 24, 323-336.
- Gutiérrez-Becker, L. (2008) Caracterización de los sistemas dunares costeros del NW ibérico y su evolución durante el Cuaternario. Universidad de Coruña. Tesis doctoral.
- Hardt, J.; Lüthgens, C.; Hebenstreit, R.; Böse, M. (2016) Geochronological (OSL) and geomorphological investigations at the presumed Frankfurt ice marginal position in northeast Germany. *Quaternary Science Reviews* 154, 85-99.
- Huntley, D. J.; Godfrey-Smith, D. I.; Thewalt, M. L. W. (1985a) Optical dating of sediments. *Nature* 313, 105-107.
- Huntley, D. J. & Lamothe, M. (2001) Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Canadian Journal of Earth Sciences* 38, 1093-1106.
- IHM (2006). Carta náutica N°412ª (Rías de Ferrol, Ares, Betanzos y La Coruña) 1:25.000, VI Edición. Armada Española. Ministerio de Defensa.
- Jacobs, Z. (2008) Luminescence chronologies for coastal and marine sediments. *Boreas* 37, 508-535.
- Jain, M.; Murray, A. S. & Bøtter-Jensen, L. (2003) Characterisation of blue-light stimulated luminescence components in different Quartz samples: implications for dose measurement. *Radiation Measurements* 37, 441-449.
- Jalut, G.; Turu i Michels, V.; Deboubat, J.J.; Otto, T.; Ezquerro, J.; Fontugne, M.; Belet, J.M.; Bonnet, L.; Garcia de Celis, G.; Redondo-Vega, J.M.; Vidal-Romaní, J.R.; Santos, L. (2010) Paleoenvironmental studies in NW Iberia (Cantabrian range): vegetation history and synthetic approach of the last deglaciation phases in the western Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297 (2); 330-350.
- Kars, R.H.; Reimann, T.; Wallinga, J. (2014) Are feldspar SAR protocols appropriate for post-IR IRSL dating? *Quaternary Geochronology* 22, 126-136.
- Lancaster, N. (2008) Desert dune dynamics and development: insights from luminescence dating. *Boreas* 37, 559-573.
- Li, B.; Jacobs, Z.; Roberts, R.G.; Li, S.-H. (2013) Extending the age limit of luminescence dating using the dose-dependent sensitivity of MET-pIRIR signals from K-feldspar. *Quaternary Geochronology* 17, 55-67.
- Lisiecki, L.E.; Raymo, M.E. (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}O$  records. *Paleoceanography*, 20, PA1003.
- Lommertzen, K. (2011) Landscape Genesis. Marine and River Terraces around the Miño Estuary. Wageningen University and Research Centre y Universidade da Coruña. Tesis doctoral.
- López-Cancelo, L. (2004) Cambios paleoambientales en el NW peninsular, durante el Holoceno, determinados a partir del estudio de foraminíferos bentónicos. Universidad de A Coruña. Tesis doctoral.
- López-Martínez, N.; Fernández-Marrón, M.T.; Peláez-Campomanes, P. y De la Peña-Zarzuelo, A. (1993) Estudio paleontológico en las cuencas terciarias de Galicia. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 6, 19-28.
- Martins, A.A.; Cunha, P.P.; Buylaert J.-P.; Huot, S.; Murray, A.S.; Dinis, P.; Stokes, M. (2010) K-Feldspar IRSL dating of a Pleistocene river terrace staircase sequence of the Lower Tejo River (Portugal, western Iberia).
- Mayya, Y.S.; Morthekai, P.; Murarib, M.K.; Singhvi, A.K. (2006) Towards quantifying beta microdosimetric effects in single-grain quartz dose distribution. *Radiation Measurements* 41, 1032-1039.
- McDougall, I. (1979) The present status of the geomagnetic polarity time scale. In M.W. McElhinny (ed.): *The Earth: its origin, structure and evolution*, Academic Press, London, 543pp.

Medialdea, A. (2013) Towards the reconstruction of Floyd histories: Luminescence dating of palaeoflood deposits. Universidad Autónoma de Madrid. Tesis doctoral.

Mosquera-Santé, M.J (2000) Evolución post-glaciar del nivel del mar en el NO de la Península Ibérica: El caso del golfo Ártabro. Universidad de A Coruña. Tesis doctoral.

Murray, A. S.; Olley, J. M. & Caitcheon, G. G. (1995) Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews* 14, 365–371.

Murray, A.S. and Wintle, A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single- aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.

Murray, A. S. & Olley, J. M. (2002) Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria* 21, 1–15.

Murray, A.S.; Thomsen, K.J.; Masuda, N.; Buylaert, J.P.; Jain, M. (2012) Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals. *Radiations Measurements* 47, 688-695.

Muñoz-Salinas, E.; Castillo, M.; Caballero, L.; Lacan, P. (2017) Understanding landscape dynamics of the Sierra Juárez, southern Mexico: An exploratory approach using inherited luminescence signals. *Journal of South American Earth Sciences* 76, 208-217.

NGRIP members, 2004 (*mirar Andersen et al.; 2004*)

Nonn, H. (1966) Les régions cotières de la Galice (Espagne). Etude géomorphologique. Publications de la Faculté des lettres de L'Université de Strasbourg. Foundation Baulig. Tomo III. 591 pp.

Olley, J.M.; Murray, A.S. and Roberts, R.G. (1996) The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burial dose rates in fluvial sediments. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)* 15, 751-760.

Olley, J.; Caitcheon, G. & Murray, A. (1998) The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews* 17, 1033–1040.

Olley et al., 1999; Olley, J. M., Caitcheon, G. G. & Roberts, R. G. 1999: The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 30, 207–217.

Olley, J. M.; Pietsch, T. & Roberts, R. G. (2004b) Optical dating of Holocene sediments from a variety of geomorphic settings using single grains of quartz. *Geomorphology* 60, 337–358.

Olley, J. M.; Roberts, R. G.; Yoshida, H. & Bowler, J. M. (2006) Single-grain optical dating of grave-infill associated with human burials at Lake Mungo, Australia. *Quaternary Science Reviews* 25, 2469–2474.

Palacios, D.; De Andrés, N.; Gómez-Ortiz, A.; García-Ruiz, J.M. (2016) Evidence of glacial activity during the Oldest Dryas in the mountains of Spain. En: Hughes, P.K. & Woodward, J.C. (Eds) *Quaternary Glaciation in the Mediterranean Mountains*. Geological Society, London, Special Publications, 433.

Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. (2010) Small isolated glacial catchments as priority target for cosmogenic surface dating of Pleistocene climate fluctuations, SE Pyrenees. *Geology*, 38; 891-894.

Pareto, L. (1865) Note sur les subdivisions que l'on pourrait établir dans les terrains tertiaires de l'Apennin septentrional. *Bulletin de la Société Géologique de France* 2, 210-277.

Peña, J.L.; Sancho, C.; Lewis, C.; McDonald, E. And Rhodes, E. (2004) Datos cronológicos de las morrenas terminales del Gállego y su relación con las terrazas fluvio-glaciares (Pirineos de Huesca). *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*; 71-84. Zaragoza (Spain).

- Petit, J.R.; Barkov, N.I.; Barnola, J.-M.; Basile, I.; Bender, M.; Chappellaz, J.; Davis, M.; Delaygue, G.; Delmotte, M.; Kotlyakov, V.M.; Legrand, M.; Lipenkov, V.Y.; Lorius, C.; Pepin, L.; Ritz, C.; Saltzman, E. & Stievenard, M. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.
- Petit, J.R.; Raynaud, D.; Lorius, C.; Jouzel, J.; Delaygue, G.; Barkov, N.I.; Kotlyakov, V.M. (2000) A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Porat, N.; Zilberman, E.; Amit, R.; Enzel, Y. (2001) Residual ages of modern sediments in an hyper-arid region, Israel. *Quaternary Science Reviews* 20, 795-798.
- Przegietka, K.R.; Chruscinska, A. (2013) Analysis of optical bleaching of OSL signal in sediment Quartz. *Radiation Measurements* 56, 257-261.
- Quinif, Y. and Maire, R.; (1996) Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin cave, French Pyrenees. *Quaternary Research*, 49; 37-50.
- Railsbak, L.B.; Liang, F.; Vidal-Romaní, J.R.; Garret, K.B.; Sellers, R.C.; Vaquero-Rodríguez, M.; Grandal-D'Anglade, A.; Cheng, H.; Edwards, R.L. (2017) Radiometric, isotopic, and petrographic evidence of changing interglacials over the past 550,000 years from six stalagmites from the Serra do Courel in the Cordillera Cantábrica of northwestern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 466, 137–152. DOI: 10.1016/j.palaeo.2016.11.020.
- Ramos, A.M.; Cunha, P.P.; Cunha, L.S.; Gomes, A.; Lopes, F.C.; Buylaert, J.-P.; Murray, A.S. (2012) The River Mondego terraces at the Figueira da Foz coastal area (western central Portugal): Geomorphological and sedimentological characterization of a terrace staircase affected by differential uplift and glacio-eustasy. *Geomorphology* 165-166, 107-123.
- Rodríguez- Rodríguez, L.; Jiménez-Sánchez, M.; Domínguez-Cuesta, M.J.; Rinterknecht, V.; Pallás, R.; Bourlès, D.; Valero-Garcés, B. (2013) A multiple dating-method approach applied to the Sanabria Lake moraine complex (NW Iberian Peninsula, SW Europe). *Quaternary Science Reviews*, 83; 1-10
- Roberts, H.M. (2008) The development and application of luminescence dating to loess deposits: a perspective on the past, present and future. *Boreas* 37, 483-507.
- Rhodes, E.J. (2011) Optically Stimulated Luminescence Dating of Sediments over the Past 200.000 Years. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39, 461-488.
- Rittenour, T.M. (2008) Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological research. *Boreas* 37, 613-635.
- Sanjurjo-Sánchez, J. and Vidal Romaní, J.R. (2011) Luminescence Dating of Pseudokarst Speleothems: A first approach. *Spectroscopy Letters* 44, 1-6.
- Sanjurjo-Sánchez, J. y Vidal Romaní, J.R. (2013) Problemas nuevos y procedimientos de datación por OSL para los sedimentos litorales del NO de la Península Ibérica. VII Jornadas de Geomorfología Litoral, Oviedo, España. *Geotemas* 14, 47-50.
- Schmidt, E.D.; Tsukamoto, S.; Frenchen, M.; Murray A.S. (2014) Elevated temperature IRSL dating loess sections in the East Eifel region of Germany.
- Serrano, E.; González-Trueba, J.J.; González-García, M. (2012) Mountain glaciation and paleoclimate reconstruction in the Picos de Europa (Iberian Peninsula, SW Europe). *Quaternary Research* 78, 303-314.
- Singarayer, J.S.; Bailey, R.M. (2003) Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation. *Radiation Measurements* 37, 451–458.
- Spooner, N. A. (1994) The anomalous fading of infrared-stimulated luminescence from feldspars. *Radiation Measurements* 23, 625–632.

- Stokes, S.; Bray, H. E. & Blum, M. D. (2001) Optical resetting in large drainage basins: Tests of zeroing assumptions using single-aliquot procedures. *Quaternary Science Reviews* 20, 879–885.
- Taboada, M.; Fernández-Mosquera, D.; López-González, F.; Grandal D'Anglade, A.; Vidal-Romaní, J.R. (1999) Implicaciones paleoecológicas inferidas de la caracterización isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ ) del colágeno óseo de *Ursus spelaeus* Ros.-Hein. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 24; 73-87.
- Thiel, C.; Buylaert, J.-P.; Murray, A.; Terhorst, B.; Hofer, I.; Tsukamoto, S.; Frenchen, M. (2011) Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) – Testing the potencial o fan elevated temperature post-IR IRSL protocol. *Quaternary International* 234, 23-31.
- Thomas, P.J.; Murray A.S.; Granja, H.M.; Jain, M. (2008) Optical dating of late Quaternary coastal deposits in Northwestern Portugal. *Journal of Coastal Research*, 24; 134-144.
- Thomsen, K.J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L.; Jungner, H. (2003) Variation with depth of dose distributions in single grains of quartz extracted from an irradiated concrete block. *Radiation Measurements* 37, 315-321.
- Thomsen, K.J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L. (2005) Sources of variability in OSL dose measurements using single grains of Quartz. *Radiation measurements* 39, 47-61.
- Thomsen, K.J.; Murray, A.S.; Bøtter-Jensen, L.; Kinahan, J. (2007) Determination of burial dose in incompletely bleached fluvial samples using single grains of quartz. *Radiation Measurements* 42, 370-379.
- Thouveny, N.; De Beaulieu, J.L.; Bonifacy, E.; Creer, K.M.; Guiot, J.; Icole, M.; Johnsen, S.; Jouzel, J.; Reille, M.; Williams, T.; Williamson, D. (1994) Climate variations in Europe over the past 140kyr deduced from rock magnetism. *Nature*, 371; 503-506.
- Thouveny, N.; Moreno, E.; Delanghe, D.; Candon, L.; Lancelot, Y.; Shackleton, N.J. (2000) Rock magnetic detection of distal ice-rafted debris: clue for the identification of Heinrich layers on the Portuguese margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 180; 61-75.
- Trauerstein, M.; Lowick, S.E.; Preusser, F.; Schlunegger, F. (2014) Small aliquot and single grain IRSL and post-IR IRSL dating of fluvial and alluvial sediments from the Pativilca valley, Peru. *Quaternary Geochronology* 22, 163-174.
- Trinidad, M.J.; Prudêncio, M.I.; Sanjurjo-Sánchez, J.; Vidal-Romaní, J.R.; Ferraz, T.; Fernández-Mosquera, D.; Dias, M.I. (2013) Post-depositional processes of elemental enrichment inside dark nodular masses of an ancient aeolian dune from A Coruña, Northwest Spain. *Geologica Acta* 11, 231-244.
- Turu, V.; Vidal-Romaní, J.R. & Gómez-Mosquera, D. (2011) Primeras dataciones con  $^{10}\text{Be}$  cosmogénico en Andorra el “LGM” (Last Global Maximum) y “the Last Termination” en los valles del Gran Valira y la Valira del Nord (Principado de Andorra, Pirineos Orientales). XIII Reunión de Cuaternario Español: El Cuaternario en España y áreas afines, avances en 2011, Andorra la Vella, 19-24.
- Turu, V.; Calvet, M.; Bordonau, J.; Gunnell, Y.; Delmas, M.; Vilaplana, J.M. & Jalut, G. (2016) Did Pyrenean glaciers dance to the beat of global climatic events? Evidence from the Würmian sequence stratigraphy of an ice-dammed palaeolake depocentre in Andorra. In Hughes, P. D. & Woodward, J. C. (eds), *Quaternary Glaciation in the Mediterranean Mountains*, Geological Society, London, Special Publications, 433.
- Turu, V.; Jalut, G.; López, C. (2016) Glaciation in the South-Eastern Pyrenees between NGRIP/GRIP GS-9 and GS-1 stadials and the Holocene Onset: Extended palaeoenvironmental record from the Valira Valleys (Principality of Andorra) and E-W correlations between glaciated massifs. (in press.)
- Vidal-Romaní, J.R. (1974) Sedimentos marinos antiguos en la costa de A Coruña. Trabajo inédito. Depósito del Laboratorio Xeolóxico de Laxe.
- Vidal-Romaní, J.R. (1978) El periodo Cuaternario en Galicia. *Gallaecia* 3/4 Separata.

- Vidal-Romaní, J.R.; Pérez-Alberti, A.; Grajal, M. (1979) Testimonios de climas semiáridos en el Cuaternario de Galicia. En: *Actas de la 3ª reunión nacional. Grupo Español de trabajo del Cuaternario. El Cuaternario en medios semiáridos*. Inst. Geog. Aplic. C.S.I.C. Madrid.
- Vidal-Romaní, J.R. y Santos, M.L. (1993) Cronología relativa del máximo glaciar finipleistoceno en el sector nor-oriental de la Serra de Queixa (Ourense; Galicia; España). *Actas III Reunión del Cuaternario Ibérico*, G.T.P.E.Q. – G.E.T.C.; 215-222.
- Vidal-Romaní, J.R. (1996) Geografía de Galicia. En: *Geomorfología de Galicia*. Tomo XVII. Hércules Ediciones S.A. A Coruña, 36-60.
- Vidal-Romaní, J.R.; Fernández-Mosquera, D.; Marti, K.; De Brum-Ferreira, A. (1999) Nuevos datos para la cronología glaciar pleistocena en el NW de la Península Ibérica. *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 24; 7-29.
- Vidal-Romaní, J.R.; Santos-Fidalgo, L.; Lopez-Cancelo, L.; Mosquera-Santé, M.J.; Leira-Campos, M. (2000) Storminess variation along the atlantic seaboard of Europe over the last 2000 years: Holocen storminess from coastal barriers in North-West Spain. (Internal report).
- Vidal-Romaní, J.R. (2002) Relieve actual de Galicia. En: *Galicia. Naturaleza*. Tomo XXXVI: Historia Natural. Geología. Hércules de Ediciones, S.A.. Capítulo 6; pp.: 304-341.
- Vidal-Romaní, J.R.; Sanjurjo-Sánchez, J.; Grandal- D'Anglade, A.; Vaqueiro-Rodríguez, M.A.; Fernández-Mosquera, D. (2010) Geocaracterización de yacimientos arqueológicos en medio sedimentario: cronología absoluta y relativa. En: López Díaz, A.J. & Ramil Rego, E. (Ed.): *Arqueoloxía: Ciencia e Restauración*. Museo de Prehistoria e Arqueoloxía de Vilalba, Vilalba (Lugo). Monografías, 4; 7-19.
- Vidal-Romaní, J.R.; Fernández-Mosquera, D.; Marti, K. (2015) The glaciation of Serra de Queixa-Invernadoiro and Serra do Gerês-Xurés, NW Iberia. A critical review and a cosmogenic nuclide ( $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$ ) chronology. En: *Cadernos do laboratorio xeolóxico de Laxe*, 38; 25-44.
- Viveen, W.; Braucher, R.; Bourlès, D.; Schoorl, J.M.; Veldkamp, A.; Balen, R.T.; Wallinga, J.; Fernández-Mosquera, D.; Vidal-Romaní, J.R.; Sanjurjo-Sánchez, J. (2012) A 0.65 Ma chronology and incision rate assessment of the NW Iberian Miño River terraces based on  $^{10}\text{Be}$  and luminescence dating. *Glob. Planet. Chang.* 94–95, 82–100.
- Viveen, W. (2013) Multi-scale Tectonic Controls on Fluvial Terrace Formation in a Glacioeustatically-dominated River System: Inferences From the Lower Miño Terrace Record. Wageningen University, Wageningen (The Netherlands). Tesis doctoral. 222pp.
- Viveen, W.; Schoorl, J.M.; Veldkamp, A.; Balen, R.T. (2014) Modelling the impact of regional uplift and local tectonics on fluvial terrace preservation. *Geomorphology* 210, 119-135.
- Viveen, W.; Sanjurjo-Sánchez, J.; Goy-Diz, A.; Veldkamp, A.; Schoorl, J.M. (2014) Paleofloods and ancient fishing weirs in NW Iberian Rivers. *Quaternary Research* 82, 56-65.
- Waelbroeck, C.; Labeyrie, L.; Michel, E.; Duplessy, J.C.; McManus, J.; Lambeck, K.; Balbon, E. and Labracherie, M. (2002) Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews* 21, 295-305.
- Wallinga, J.; Murray, A.; Wintle A. (2000) The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. *Radiation Measurements* 32, 529-533.
- Wallinga, J. (2002) On the detection of OSL age overestimation using single-aliquot techniques. *Geochronometria* 21, 17-26.
- Wallinga, J. (2002) Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. *Boreas* 31, 303-322.
- Wintle, A.G.; Murray, A.S. (1998) Towards the development of a preheat procedure for OSL dating of quartz. *Radiation Measurements* 29, 81-94.

Wintle, A.G.; Murray, A.S. (2006) A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41, 369-391.

Internet:

<https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>



## Capítulo 10.

### Conclusiones.





## 10. Conclusiones.

### 10.1. Aplicación de la técnica de luminiscencia OSL y pIR-IRSL para los depósitos fluviales.

I. Los materiales empleados para la datación por luminiscencia para los depósitos fluviales costeros -cuenca del río Mero y península de Sada (A Coruña, Galicia), así como aquellos desarrollados en la desembocadura del río Ulla a la altura de Catoira (Pontevedra, Galicia)- presentan una respuesta variable, teniendo en cuenta que las tasas de radiación natural (*DR*) estimadas para cada muestra son similares.

Los granos de cuarzo purificado que conforman las alícuotas multigrano a partir de los cuales se mide la señal OSL, presentan una baja sensibilidad de luminiscencia que se traduce en una señal OSL poco intensa y un error elevado. A ello se suma una proporción considerable de alícuotas cuya señal OSL está por encima del rango de saturación, siendo necesario analizar un gran número de alícuotas para la obtención de dosis equivalentes por debajo de dicho umbral. No obstante, estos aspectos no han impedido la estimación de la dosis equivalente al tiempo de enterramiento de estos materiales a partir de la técnica de datación por luminiscencia OSL. Se ha considerado además la contribución de la señal OSL rápida y la posible contribución de las componentes media y lenta de la señal OSL, que se ha reducido empleando el método de integración EBG.

Por su parte, los granos de feldespato potásico purificado extraídos de las mismas muestras, mucho menos abundantes que los de cuarzo, presentan también una baja sensibilidad y una señal pIR-IRSL poco intensa, a excepción de la muestra de Vilaboa (MPK8; Cuenca del río Mero). No obstante, todas ellas presentan una señal pIR-IRSL por encima del umbral de saturación debido a un blanqueado incompleto de la señal IRSL, imposibilitando la estimación de la dosis equivalente a partir esta técnica.

II. El protocolo SAR resulta adecuado para la estimación de la dosis equivalente (*De*) a partir de la señal OSL para cada una de estas muestras, en base a los resultados obtenidos en el test *Dose-recovery*. Además, a partir de la estimación de la sobre-dispersión (*OD*) de este test, se descartan factores de variabilidad intrínsecos, como variaciones en la estadística de cuentas o reproductibilidad del equipo, que puedan afectar a una estimación fiable de la misma.

III. La distribución de las estimaciones de las dosis equivalentes (*Des*) obtenidas a partir de la señal OSL de cada alícuota, presentan una amplia dispersión que se atribuye a la baja sensibilidad del cuarzo empleado y también a las diferencias observadas en la distribución del potasio -y por tanto, del isótopo  $^{40}\text{K}$  dentro del sedimento- y que dan lugar a una radiación beta heterogénea, incidiendo de forma variable sobre los granos de cuarzo. No se observa, además, existencia del fenómeno de blanqueamiento incompleto de la señal OSL, a excepción de la muestra de Cecebre (MPK6), por lo que, a estos efectos, la utilización del modelo de edad

central CAM resulta adecuada para estos depósitos fluviales, a excepción, también, de la muestra de Borreiros (ABC3) debido al alto número de estimaciones de la *De* muy por encima del umbral de saturación.

IV. El rango de edad estimado para la mayoría de las muestras pertenecientes a los depósitos fluviales costeros se ubican dentro del Pleistoceno Superior entre los 37.000 y los 128.000 años, coincidiendo con el final de la última etapa interglaciar, hace unos 130.000 años, y el comienzo de la última etapa glacial. La única excepción viene representada por la muestra correspondiente a uno de los niveles inferiores del depósito de Borreiros (río Ulla en Catoira), con una edad estimada entre los 124.000 y los 227.000 años, desarrollada también a lo largo de una prolongada etapa fría durante el Pleistoceno Medio y previa a la pulsación interglaciar mencionada.

#### 10.2. Aplicación de la técnica de luminiscencia OSL y pIR-IRSL para los depósitos eólicos.

I. Los granos de cuarzo purificado extraídos de los depósitos eólicos presentan también una baja sensibilidad de luminiscencia con una señal OSL poco intensa aunque con un menor error asociado si se compara con los granos de cuarzo extraídos de los depósitos fluviales. Por su parte, los granos de feldespato, presentan una señal pIR-IRSL muy intensa y con un error asociado muy reducido. No obstante, tanto para OSL como para pIR-IRSL, la señal de luminiscencia se sitúa generalmente por debajo del umbral de saturación, permitiendo una estimación de la *De* más fiable.

II. La distribución de las estimaciones obtenidas mediante la señal OSL presenta una amplia dispersión. En base a la sobredispersión estimada a partir del test *Dose-recovery*, a partir del cual se establece la adecuación favorable del protocolo SAR para OSL (así como para el protocolo SAR modificado para pIR-IRSL), la dispersión observada no se asocia a aspectos intrínsecos relacionados con la sensibilidad de los materiales, la metodología empleada o la reproducibilidad de los equipos utilizados. Así, en ausencia de fenómenos como el de blanqueamiento incompleto para depósitos eólicos, se atribuye dicha dispersión a variaciones en la dosimetría como puede ser el desequilibrio radiactivo observado para algunas de las muestras como las de Punta Mortaza, Xalfas y Tal. Es por ello por lo que la aplicación del modelo de edad central CAM para estimara la dosis equivalente (*De*) resulta el más adecuado.

III. La aplicación de las técnicas de luminiscencia OSL y pIR-IRSL resultan herramientas adecuadas para datación absoluta de las dunas fósiles de la costa atlántica gallega desarrolladas a lo largo del Pleistoceno Medio y Superior. A partir de la señal pIR-IRSL se obtienen edades entre 155.000 y 174.000 años para la muestra de Bornalle, entre 115.000 y 138.000 años para las muestras de Punta Langosteira y de Cíes- Lagoa dos Nenos (CLN1), y entre 58.000 y 66.000 años para la muestra de Corme.

Mediante la señal OSL se obtiene un rango de edad para el último episodio eólico descrito ubicado entre los 13.000 y los 34.000 años y representando, además, por las muestras del depósito de Cíes-Alto da Figueira

(CAF1, CAF2 y CAF3), Xalfas, Tal y Punta Mortaza. Esta circunstancia a partir de la cual estas seis últimas muestras coinciden en el tiempo de formación revelan la importancia de este episodio, coincidiendo, además, con el final de la etapa fría que se registra desde hace 130.000 o 125.000 años y que incluye un mínimo en la temperatura global entre los 20.000 y 30.000 años seguido del posterior incremento de las temperaturas y ascenso del nivel del mar que tiene lugar desde hace 15.000 años aproximadamente, y que da paso a la última pulsación interglaciar holocena.





